


El agua en el cosmos

La matriz de la vida



Un paseo por el
COSMOS

EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigiralización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

El agua en el cosmos

La matriz de la vida

RBA

Imagen de cubierta: Recreación de Europa, un satélite de Júpiter cubierto de hielo, con géiseres por los que agua del interior escapa al espacio en forma gaseosa, que ilustra la abundancia del agua en el universo y sus posibles estados. La considerada «matriz de la vida» es la fase líquida, minoritaria en el cosmos.

*A Cristina y Laura
A mis amigos cosmopolitas*

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Juan Antonio Aguilera Mochón por el texto
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.U.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: D.A. Aguilar/Centro para la Astrofísica de la Universidad Harvard y el Instituto Smithsonian: 139; Yuri Beletsky (LCO)/ESO: 130-131; Cassini Imaging Team, SSI, JPL, ESA, NASA: 107b; Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA: 95a; Pam Engebretson/Universidad de California en Santa Cruz: 115a; ESO/M. Kornmesser: 149b; ETH Zurich: 79b; Expedición de 2004 al Cinturón de Fuego del Pacífico/Oficina de Exploración Oceánica de la NOAA/Bob Embley: 31b; A.D. Fortes/UCL/STFC: 112; Mark Garlick/SPL/Age Fotostock: portada; NASA/Adler/Universidad de Chicago/Wesleyan/JPL-Caltech: 147; NASA/JHUAPL/SWRI: 115b; NASA/JPL-Caltech: 105, 149a; NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell: 47; NASA/JPL-Caltech/Universidad de Arizona: 95b; NASA/JPL/ESA/K. Retherford/SWRI: 103; NASA/JPL/Universidad de Colorado: 107a; Richard Siemens/Universidad de Alberta: 61, 61 (foto inserta); Sociedad Química Estadounidense (ACS): 109; Emily Stone, NSF: 31a; Universidad Ben-Gurion del Negev: 79a; Universidad Cornell/Instituto de Ciencia Planetaria/NASA/Google Earth/Alexis Rodriguez, Alberto G. Fairén *et al.*: 96.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9082-3

Depósito legal: B-12518-2017

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7	
CAPÍTULO 1	Retrato del agua	15
CAPÍTULO 2	El agua en la Tierra	49
CAPÍTULO 3	El agua en el sistema solar	85
CAPÍTULO 4	El agua en el universo	121
LECTURAS RECOMENDADAS	153	
ÍNDICE	155	

INTRODUCCIÓN

El agua es una de las moléculas más abundantes del universo, y para muchos la más extraordinaria. Ya la consideraban esencial las antiguas cosmogonías, tanto orientales como occidentales, para las que constituía un *elemento* fundamental en la explicación de lo que nos rodea y constituye, y en especial de la vida. Cuando Paracelso, en el siglo xvi, dijo que el agua es «la matriz del mundo y de todas sus criaturas», estaba recogiendo una vieja idea, pues ya en el siglo vi a.C., para Tales de Mileto el agua era el principio de todas las cosas.

Aunque, a veces, el también llamado *elixir de la vida* trae consigo el terror por la amenaza de la muerte. En efecto, aunque de manera universal el agua simboliza la vida, la pureza, y todo tipo de buenas cualidades, también es ancestral y está extendido el temor al agua por su exceso, su carencia, su indomable fuerza o su eventual morbidez. Por todo ello, el agua ha servido de fuente de inspiración para poderosos mitos sobre el surgimiento del mundo, pero también sobre su destrucción.

La importancia del agua para la prosperidad de nuestra especie queda reflejada en la localización de las colectividades humanas, desde la de los más pequeños y dispersos asentamientos

hasta la de las grandes civilizaciones antiguas, que fueron notoriamente fluviales. Si Mesopotamia floreció entre los ríos Tigris y Éufrates, la cultura egipcia lo hizo en torno al Nilo, la china alrededor del Amarillo y el Yangtsé, y la del valle del Indo bebió de este gran río del mismo nombre. El medio marino fue fundamental, a su vez, para la expansión civilizadora; piénsese de nuevo en China, o en el efecto civilizador del mar Mediterráneo, empezando con la cultura fenicia.

El agua, como es obvio, no es solo esencial para nuestra especie: hasta en los lugares más secos del planeta, si hay seres vivos es porque existe suficiente agua para su subsistencia. Después del avance de la ciencia, seguimos sin concebir la vida sin el agua, que ya debió estar presente en forma líquida para favorecer su origen. El conocimiento científico sobre el agua no ha rebajado el interés en ella, sino al contrario, y todavía quedan considerables incógnitas sobre su naturaleza, sus posibles estados y sus propiedades.

Si queremos entender el agua y el porqué de su importancia para la vida —y para la geología— terrestre, así como el alcance de su posible presencia en otros mundos del sistema solar o fuera de él, necesitamos conocerla lo mejor posible. Por ello, comenzaremos nuestra andadura en torno al agua precisamente con el fascinante estudio de su naturaleza y sorprendentes propiedades, a menudo tan antiintuitivas como convenientes para la vida. La molécula de H_2O , con toda su aparente simplicidad, debe dar cuenta de todas esas propiedades. Hay mucha hermosura estructural en la sencillez de las moléculas de agua y sus modos de agruparse (que a veces se visualiza en formas como las de los copos de nieve), y belleza intelectual en su poder explicativo.

Merece la pena analizar cómo la naturaleza de las moléculas de agua explica su modo de asociarse entre sí y con moléculas diferentes, así como la repulsión hacia ella que experimentan algunas otras, y todo esto ayuda, a su vez, a entender propiedades y comportamientos. Por ejemplo, ¿quién diría que la congelación del agua hace de ella un sólido menos denso, en vez de más, como es lo usual con otros líquidos? Y, ¿cómo es

que el agua es líquida por encima de cero grados centígrados ($^{\circ}C$), cuando, si se la compara con moléculas similares, debería serlo incluso a menos de $-90^{\circ}C$? Estas respuestas las tenemos, pero no son menos estimulantes los aspectos que aún no conocemos bien, como la disposición y la dinámica del agua en su asociación con las macromoléculas de la vida.

Cada propiedad del agua es compartida por otras sustancias, pero es el conjunto de características lo que la hace única. A veces nos referimos a ella como el *disolvente universal*, pero por suerte no lo es; precisamente esa no universalidad es esencial para la vida. Concretamente, para la formación de las membranas y para el plegamiento de las proteínas es clave que las sustancias apolares no se disuelvan en agua; gran cosa la aversión al agua, o hidrofobicidad, de algunas moléculas o partes de moléculas. En conjunto, podemos afirmar que el agua constituye el mejor medio para la química del carbono que sustenta toda la vida conocida.

Por otra parte, el agua no es un mero disolvente en las reacciones de la vida, pues ahora aparece como una sustancia activa, una biomolécula crucial en sí misma.

La íntima relación del agua con la vida en la Tierra merece una consideración atenta. Lo primero que nos interesa es de dónde procede el agua terrestre, lo que incluye la de nuestros propios cuerpos. Con seguridad nos ha llegado, en parte, desde asteroides y cometas, pero ¿en qué proporción lo ha hecho, y de qué regiones del sistema solar vinieron esos visitantes? Parece imposible responder a esas preguntas, pero el agua lleva consigo una especie de «firma isotópica» que, adecuadamente interpretada, puede delatar su procedencia.

La cuantificación del agua terrestre nos da, de entrada, alguna gran sorpresa. Desde antes que Carl Sagan se refiriera a la Tierra —vista desde la lejana sonda Voyager 1— como «un punto azul pálido», solemos percibirla como un planeta acuoso y, sin embargo, nos encontramos con que globalmente vivimos en un mundo muy seco. Aunque tengamos —al menos, algunos afortunados de países sin grave estrés hídrico— la impresión de que el agua dulce nos rodea, podemos comprobar que el agua

líquida y pobre en sal representa en realidad una fracción ínfima del total. Es importante saber cómo se distribuye el agua líquida, sólida y gaseosa, y la dulce y salada, en nuestro planeta, pero no con una visión estática. Lo fundamental es conocer cómo son y se controlan sus cambios de localización y estado, esa dinámica que recoge el llamado ciclo hidrológico y esos movimientos a veces de tanto alcance como los de la gran «cinta transportadora» oceánica.

Son maravillosas las adaptaciones de los seres vivos para asegurarse la disponibilidad de agua, pero también son dolorosas las dificultades de una especie, la humana, para lograr una satisfacción universal de las necesidades hídricas vitales. La distribución del agua dulce de suficiente calidad es terriblemente desigual, hasta el punto de que muchas personas mueren cada día a consecuencia de la escasez de agua, y/o de su maléfica condición. Conviene tener conciencia del «agua virtual» que contienen incluso productos en los que no se ve el líquido por ninguna parte, pero que lo necesitan, y mucho, para su fabricación y distribución.

Con todo, los datos de cumplimiento de algunos objetivos relativos al agua de instancias internacionales en los últimos años alimentan la esperanza de alcanzar los retos más ambiciosos planteados para los siguientes. Confiamos en que, incluso con las dificultades añadidas del cambio climático, se alcancen los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, uno de los cuales (el 6) es «garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos».

Desde aquella visión poética de Sagan, se ha popularizado la consideración de la Tierra como una joya peculiar y única por la abundancia del agua responsable de aquel color azul pálido. Pero ¿solo abunda el agua en la superficie de la Tierra?, ¿es una joya azul única?

Sorprendentemente, se encuentra agua en cualquier cuerpo del sistema solar, incluso en Mercurio —el planeta más cercano al Sol— y en los cometas más lejanos. En realidad, estos últimos, y otros astros, son riquísimos en agua. La peculiaridad de la Tierra en el sistema solar es que tenga agua abundante y en

estado líquido en la superficie, pero parece que otros planetas —Venus y Marte— también la tuvieron en el pasado. Merece la pena estar al corriente de las diferentes causas que los llevaron a perderla de manera tan desastrosa, y especialmente catastrófica para los seres vivos, si los albergaban. Aunque quién sabe: ¿pueden quedar nichos, sobre todo en Marte, en los que haya aún agua capaz de sostener organismos supervivientes? Las expectativas de vida en Marte parecían cosa del pasado, y sin embargo hoy están más fundadas que hace décadas; en los años venideros esperamos conocer la respuesta a estas grandes preguntas: ¿ha existido alguna vez vida en Marte?, ¿la sigue habiendo todavía?

El agua líquida bajo la superficie (subsuperficial) parece enormemente abundante en varios —incluso muchos— satélites de los planetas gigantes gaseosos y helados. De especial interés están resultando Encélado, uno de los satélites de Saturno, y Europa, la segunda luna más próxima a Júpiter, pues pueden tener en los fondos oceánicos, gracias a la actividad hidrotermal, unos desequilibrios de energía y materia que tal vez sirvan para nutrir el origen y la evolución de la vida. Quién sabe si serán los primeros sitios fuera de la Tierra en los que la hallaremos. Los próximos años pueden darnos la respuesta, gracias a los proyectos de exploración de los satélites más prometedores.

Por otra parte, una de las noticias más insólitas sobre los mundos exteriores del sistema solar es que es posible que contengan formas de agua que se nos antojan muy extrañas, como «hielos» mucho más densos que el agua líquida, e incluso muy calientes.

¿Y qué hay del agua fuera del sistema solar? Cuando abrimos los ojos al universo, y nos ocupamos de su nacimiento, nos preguntamos por la primera formación de las moléculas de agua. Sabemos que no fue inmediata, pues hubo que esperar a que el oxígeno se «cocinara» en los hornos estelares, y a que desde ellos se distribuyera generosamente. Pero la espera mereció la pena, pues hoy el agua quizás sea, tras el hidrógeno, la molécula más abundante en el cosmos. En algunas galaxias muy lejanas y

jóvenes se han encontrado las mayores reservas de agua, pero, aunque sea en concentraciones mucho menores, estamos comprobando que es ubicua en el universo. Si bien no precisamente como agua líquida, pues predomina sobre todo como hielo y como vapor.

Es interesante seguirle la pista —gracias a los cada vez más poderosos telescopios— a nuestra molécula triatómica en el curso de la formación de los sistemas planetarios. Pero en la actualidad, lo que nos tiene en vilo es el hallazgo de más y más planetas extrasolares —exoplanetas— parecidos a la Tierra, sobre todo con probabilidad de contener agua líquida en su superficie, es decir, lo que llamamos planetas «habitables». E incluso «superhabitables»: ¿es posible que haya planetas con mejores condiciones que la Tierra, *a priori*, para sostener vida durante largos periodos de tiempo? Esta búsqueda de condiciones para la vida centrada en la existencia de agua (aunque sea un requisito necesario pero no suficiente) la ha resumido la agencia espacial estadounidense (NASA) en su consigna «sigue el agua».

Es muy probable que existan, y abunden, los «mundos océano», totalmente cubiertos de agua líquida, pero puede que tanta agua sea excesiva para el desarrollo de las formas de vida más complejas. Por otro lado, no todas las estrellas son iguales en su capacidad de sostener en su entorno mundos habitables, ni tampoco son iguales todas las galaxias. ¿Y si las hubiera mucho más habitables que la Vía Láctea?

Mientras intentamos responder a tantas preguntas, cada vez tenemos más noticias sobre planetas habitables. En los próximos años, esperamos poder conocer la naturaleza de sus atmósferas, quizá indicativas de existencia de vida, e incluso acercarnos físicamente a los más cercanos.

Merece la pena recordar, la próxima vez que nos lavemos la cara o que bebamos un vaso de agua, que estamos conectando con una historia de miles de millones de años, que nos retrotrae a la caída de cometas procedentes de los confines del sistema solar y, más lejos en el tiempo y en el espacio, a la explosión de efímeras y gigantescas estrellas. Al contemplar el cielo nocturno, pensemos que aquellas explosiones pueden haber servido

para bañar innumerables mundos, en algunos de los cuales el agua tal vez sea también «matriz de la vida», e incluso permita que otros seres se estén haciendo las mismas preguntas que nosotros.

Retrato del agua

El agua que nos rodea y que en buena medida nos constituye es la sustancia más familiar y cautivadora. Tras su sencillez subyacen unas propiedades extraordinarias y críticas para la vida, que solo pueden entenderse conociendo la pequeña molécula cuya fórmula todo el mundo recuerda: H_2O .

Incolora (o casi), inodora e insípida, el agua se nos antoja la sustancia más común y sencilla. La propia molécula de agua es una de las más simples que existen: está formada, como indica su popular fórmula química (H_2O), por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. El hidrógeno (H) es, además, el elemento más común: de cada mil átomos en el universo, unos 925 son de H. Le siguen un gas inerte, el helio (He, unos 74 de cada mil), el oxígeno (O, 0,6 de cada mil) y el carbono (C, 0,4 de cada mil). De modo que, cuando los átomos se combinan para formar moléculas, no sorprende que la de H_2O solo se vea superada en el cosmos por el H_2 (dihidrógeno), sobre todo, y tal vez por el CO (monóxido de carbono). Cuando se usa cotidianamente el término agua, por lo general se alude a su estado líquido. Pero también puede hallarse en fase sólida (hielo) o gaseosa (vapor), y de hecho estas formas —en especial el hielo— pueden ser más abundantes en el universo.

Sin embargo, la más interesante es el agua líquida, esencial para la vida conocida, por ser capaz de albergar su extraordinaria química, la *bioquímica*. Se recuerda a menudo que en 1971 el fisiólogo y premio Nobel húngaro Albert Szent-Györgyi (1893-1986) dijo que el agua es la «matriz de la vida», actualizando lo

que ya en el siglo XVI escribiera, en un contexto menos científico, el alquimista suizo Teofrasto Paracelso (1493-1541): «el agua fue la matriz del mundo y de todas sus criaturas». Agua y vida son dos términos que se asocian habitualmente, sobre todo porque no parece posible la segunda sin la primera y porque, como saben bien los laboratorios, hay que tomar medidas severas si no se quiere «contaminar» de vida el agua estéril.

El agua representa entre el 10 y más del 90% de la masa de un ser vivo (entre el 60 y el 70% del cuerpo humano). Además, la mayor parte de la vida tiene lugar en un medio externo acuoso, sobre todo en los mares y océanos, que cubren casi tres cuartas partes de la superficie de la Tierra. Todo apunta a que la vida surgió en el agua hace quizás unos 4 000 millones de años, pero hasta hace unos pocos cientos de millones no hubo organismos capaces de «saltar a tierra». No obstante, hoy sigue abundando mucho más la vida acuática que la terrestre. Esta ha tenido que desarrollar mecanismos para retener el agua y mantener un buen *equilibrio hídrico*; en los organismos pluricelulares, los líquidos extracelulares (intercelulares y circulatorios) mantienen la mayor parte de las células en un ambiente que rememora, amortiguado, el «marino».

El medio interno de todas las células, donde se producen los procesos esenciales para el mantenimiento de la vida, es un medio acuoso. Los ácidos nucleicos y las proteínas solo pueden funcionar en ese medio, y casi todas las reacciones metabólicas tienen lugar en agua: la inmensa mayoría de los *metabolitos* (intermediarios del metabolismo) se disuelven en agua y muchos incluso reaccionan con ella.

El agua resulta ser, por otra parte, un excelente regulador térmico, tanto dentro de los organismos como fuera (en este sentido, «apacigua» el clima de todo el planeta). Además, cuando la temperatura baja mucho y el agua se congela, el hielo —inusualmente— flota, de manera que forma una capa superficial termoaislante que permite que muchas formas de vida se libren, bajo él, de la congelación, en ríos, mares y lagos. Si el agua fuera menos densa que el hielo, toda ella acabaría helándose.

Estas notables características del agua, junto con otras como su transparencia a la luz visible (pero poca a la luz ultravioleta),

su viscosidad, sus propiedades ópticas, acústicas, eléctricas, etc., la hacen idónea para la vida tal y como la conocemos. Es de suponer que al menos algunas de esas características y propiedades propiciaron el origen de la vida, y que esta se ha adaptado a ellas, sacándoles gran partido. Pero el agua no solo ha sido clave en la Tierra para su biología, también lo ha sido para su geología: los movimientos y cambios de estado del agua sobre el planeta suponen una fuerza remodeladora de primera magnitud.

Por tanto, si se quiere comprender el papel del agua en la Tierra, es necesario conocerla a fondo. Este conocimiento nos servirá, asimismo, para estudiar su presencia y posibles actividades en todo el sistema solar, en la galaxia y en el conjunto del universo. ¿Qué es el agua y cuáles sus posibles comportamientos? Parecen preguntas triviales, pero aún no tenemos todas las respuestas, y las que se conocen no dejan de sorprendernos y de ofrecernos una mejor comprensión de la vida, de la Tierra y del cosmos.

LA MOLÉCULA H_2O

En diversas cosmogonías tradicionales, el agua ha sido uno de los cuatro (en la Grecia antigua y en el budismo temprano) o cinco (en el hinduismo) elementos básicos, y ha aparecido con aspectos y atribuciones mágicas en diversas religiones, en el esoterismo, en la alquimia y en la astrología. El filósofo griego Tales de Mileto (ca. 624-ca. 546 a.C.), en particular, defendió que el agua era el principio o materia originaria de la que han surgido todas las realidades del cosmos.

Sin embargo, apenas se avanzó en el conocimiento de la naturaleza objetiva del agua hasta el siglo XVIII. Hubo que esperar hasta 1781 para saber, gracias al físico y químico británico Henry Cavendish, que el agua no es un elemento, sino que «está compuesta por aire deflogistizado unido al flogisto» (sustancia hipotética que explicaría la combustión). A pesar de esto, a menudo se la sigue llamando «el líquido elemento». El químico francés Antoine-Louis de Lavoisier (1743-1794) refutó la teoría del flogisto y averiguó que el agua está formada por oxígeno (O) e hidrógeno (H);

a este último fue el propio Lavoisier quien le dio el nombre, que significa «formador de agua». En 1804, otro químico francés, Joseph-Louis Gay-Lussac, y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt, demostraron que el agua está formada por dos volúmenes de hidrógeno por cada volumen de oxígeno: por fin teníamos el agua como H_2O , una de las moléculas más pequeñas.

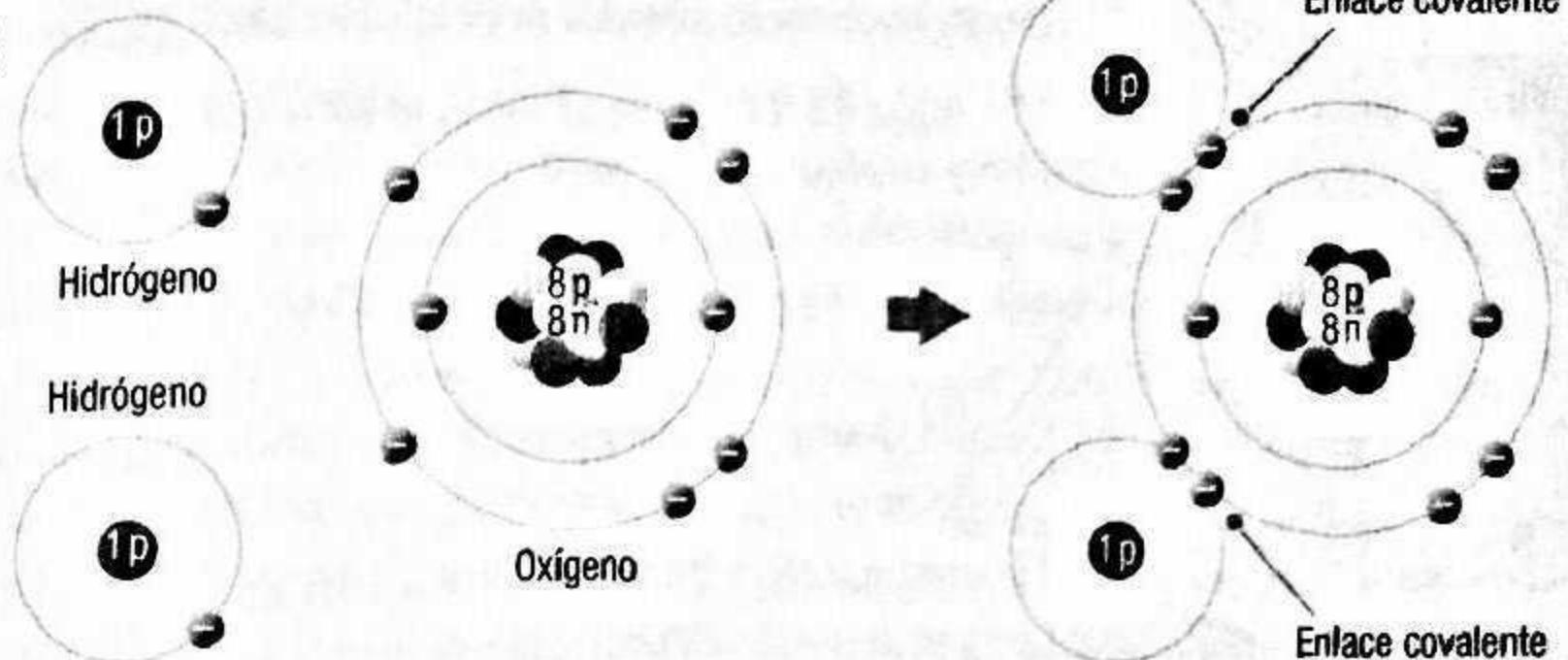
Pero la manera en que se unen los átomos de H y O es fundamental, y para ello importan sus electrones, las partículas subatómicas cargadas negativamente que rodean a los núcleos de carga positiva. El núcleo de cada átomo de H, el más pequeño que existe, solo tiene un protón (partícula subatómica de carga positiva), y lo orbita un electrón situado en una «capa» que admite un máximo de 2 (véase la figura 1). Por su parte, el átomo de O tiene 8 protones (y 8 neutrones) en su núcleo, y 8 electrones a su alrededor, de los que 2 están en una capa interna (completa, equivalente a la del H) y 6 en su capa más externa, que admite hasta 8 y es la que participa en los enlaces.

Por tanto, el H admite un electrón más a su alrededor, y el O, 2, lo que permite la formación de moléculas de H (H_2) y de O (O_2), como vemos en la imagen b de la figura 1. Cuando el O se une al H (imagen a de la figura 1), de sus 6 electrones externos, los 4 que no se enlazan forman dos parejas (igual que en el O_2), y cada uno de los otros 2 se comparte con el H, que a su vez comparte el suyo. De este modo, en el H_2O cada H tiene 2 electrones (uno suyo y otro procedente del O), y cada O tiene 8 en su capa externa (los 6 suyos y 2 de los H). Los pares de electrones compartidos forman los llamados *enlaces covalentes* (los de mayor fuerza entre átomos), que suelen representarse por rayas.

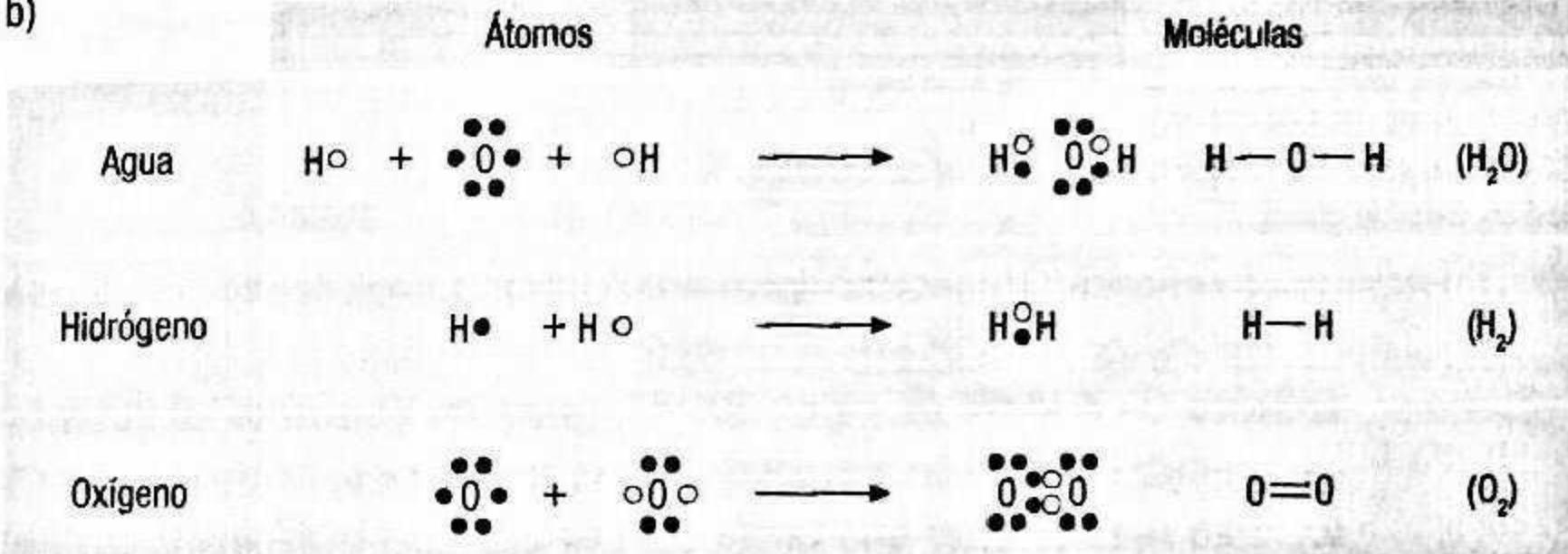
Una molécula de H_2O ($H-O-H$) tiene, por tanto, dos pares electrónicos compartidos, es decir, dos enlaces covalentes simples. Y se sabe que el ángulo entre los dos enlaces O-H no es de 180° , como podría parecer por la representación de la figura 1, y tampoco 90° , como a veces se observa en otras imágenes. El ángulo real, $104,5^\circ$, puede sorprender, pero se explica porque los electrones se distribuyen en unas regiones espaciales denominadas *orbitales moleculares*, que en este caso tendrían una geometría tetraédrica, tal como vemos en la figura 2. De los 6 electrones de

FIG. 1

a)



b)

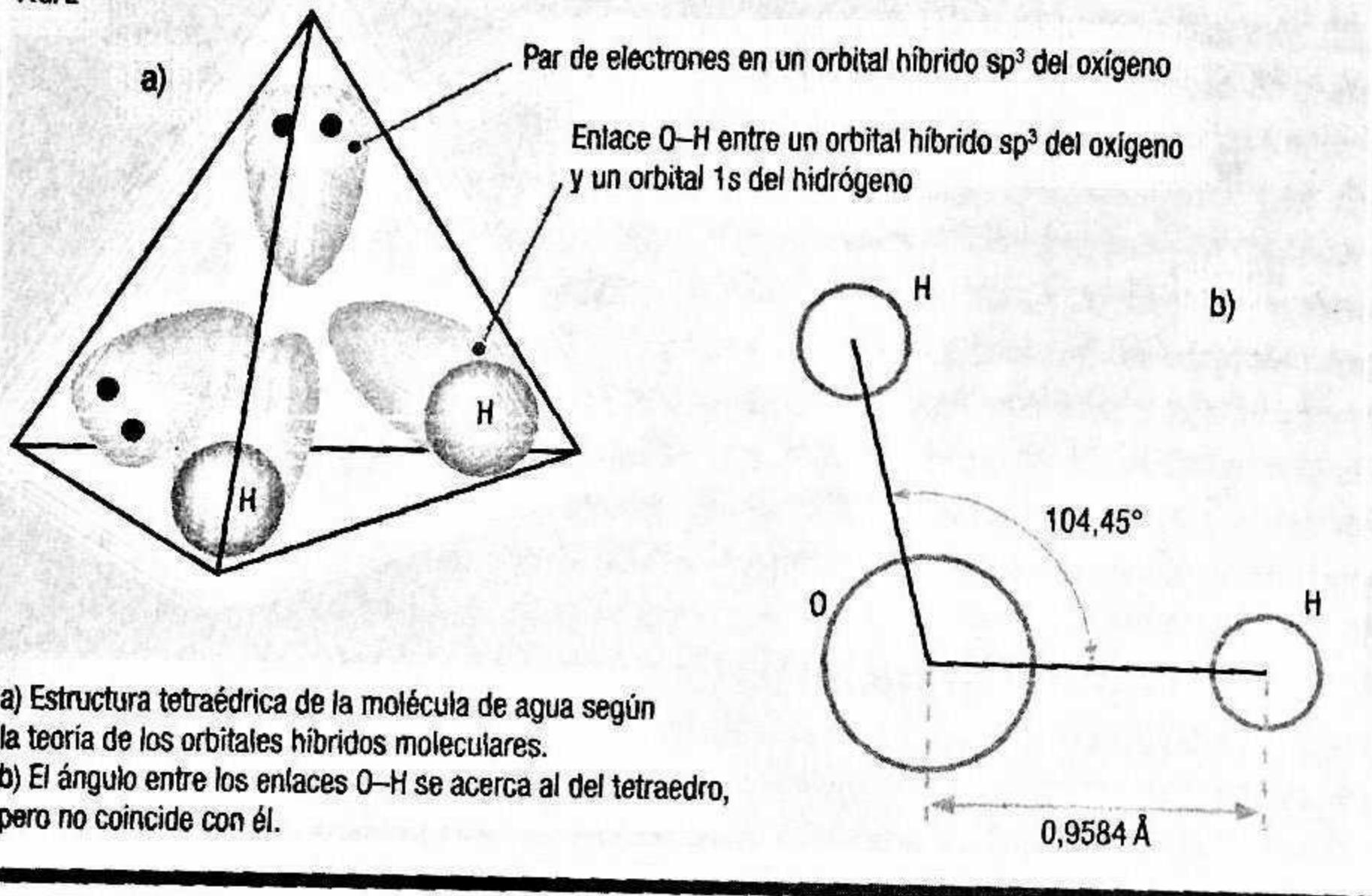


a) Formación de una molécula de agua (H_2O) a partir de sus átomos constituyentes. b) Formación de las moléculas de agua, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Los puntos gruesos representan electrones; las rayas, enlaces. En el agua, un átomo de O comparte un electrón con cada uno de los dos átomos de H. En el H_2 , cada átomo de H comparte su electrón con el otro H. En el O_2 , cada átomo de O comparte dos electrones con el otro O.

la segunda capa del O, inicialmente 2 están en un orbital circular llamado «s», y los otros 4, entre 3 orbitales «p», perpendiculares entre sí. Al unirse el O al H, los 4 orbitales citados (un s y tres p) hibridizan en 4 orbitales «sp³» con estructura tetraédrica.

En la figura 2, el oxígeno ocupa la posición central del tetraedro, y cada uno de los dos hidrógenos se localiza en dos de los cuatro vértices, mientras que en los otros dos se encuentran los pares de electrones no enlazados del oxígeno, como nubes de carga negativa. Si fuera un tetraedro perfecto, el ángulo entre los

FIG. 2



enlaces O-H sería de unos $109,5^\circ$, pero en realidad el tetraedro es irregular, un tanto asimétrico, y el ángulo es, como hemos visto, algo menor. Hay que tener en cuenta que hablamos de ángulos (y distancias) medios, pues ni unos ni otras son constantes, ya que experimentan una vibración continua.

Hay que tener en cuenta también que los enlaces H-O son, además de covalentes, *polares*, debido a que el átomo de O es más *electronegativo* que el de H, es decir, que —por la mayor carga positiva en su núcleo— atrae más que el H a cada par de electrones compartido entre ambos, de modo que hay más *densidad electrónica* cerca del O que del H.

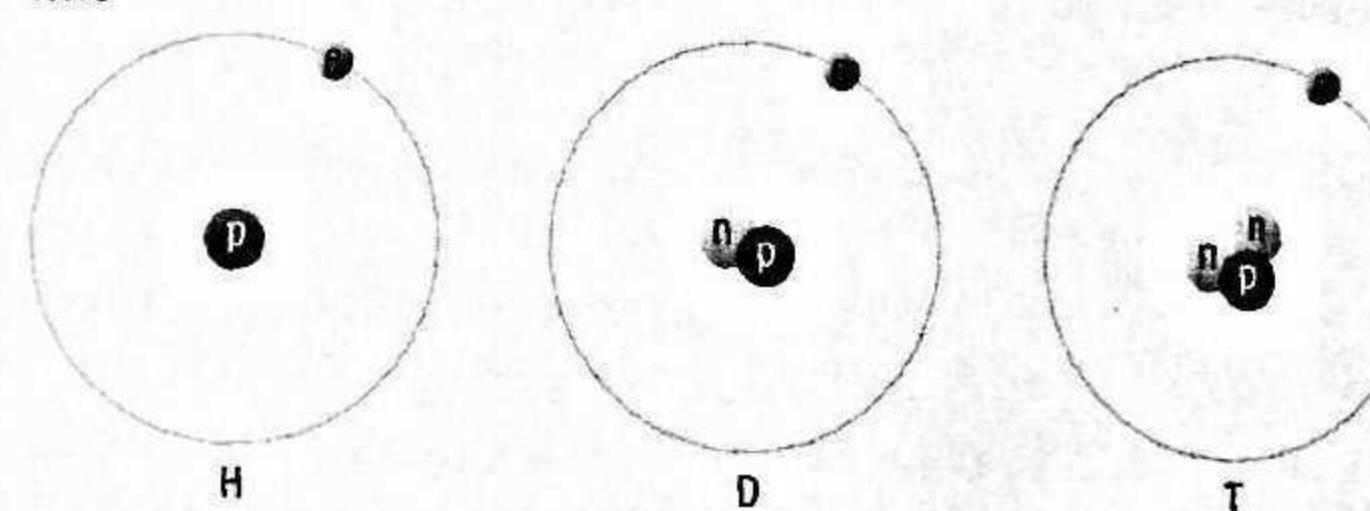
En suma, aunque la carga neta de la molécula de agua es cero, el O tiene una cierta carga negativa y los H una cierta carga positiva. Sigue habiendo controversia sobre cómo se distribuyen los electrones de los dos pares desapareados del oxígeno, pero sabemos que no «asoman» como «orejas de conejo» (véase la imagen de las págs. 24-25); la densidad electrónica parece distribuirse según se ve en el resto de dicha imagen.

Agua «pura»: una variada mezcla

Aunque el agua no lleve nada disuelto, no es solamente H_2O . La razón es que existen varios *isótopos* del H y del O. Los isótopos de un elemento son átomos con el mismo número de protones y electrones, pero en su núcleo hay diferente número de unas partículas de masa similar a la de los protones, aunque sin carga: los neutrones.

El H solo tiene un protón en su núcleo —y ningún neutrón—, pero también existe el deuterio (D), que tiene un protón y un neutrón, y el tritio (T, radiactivo), con un protón y dos neutrones (figura 3). Un protón o un neutrón tienen aproximadamente una *uma o unidad de masa atómica* ($1,66 \cdot 10^{-27}$ kg), y en compara-

FIG. 3



	^{16}O	^{17}O	^{18}O
Protones	8	8	8
Neutrones	8	9	10
Electrones	8	8	8

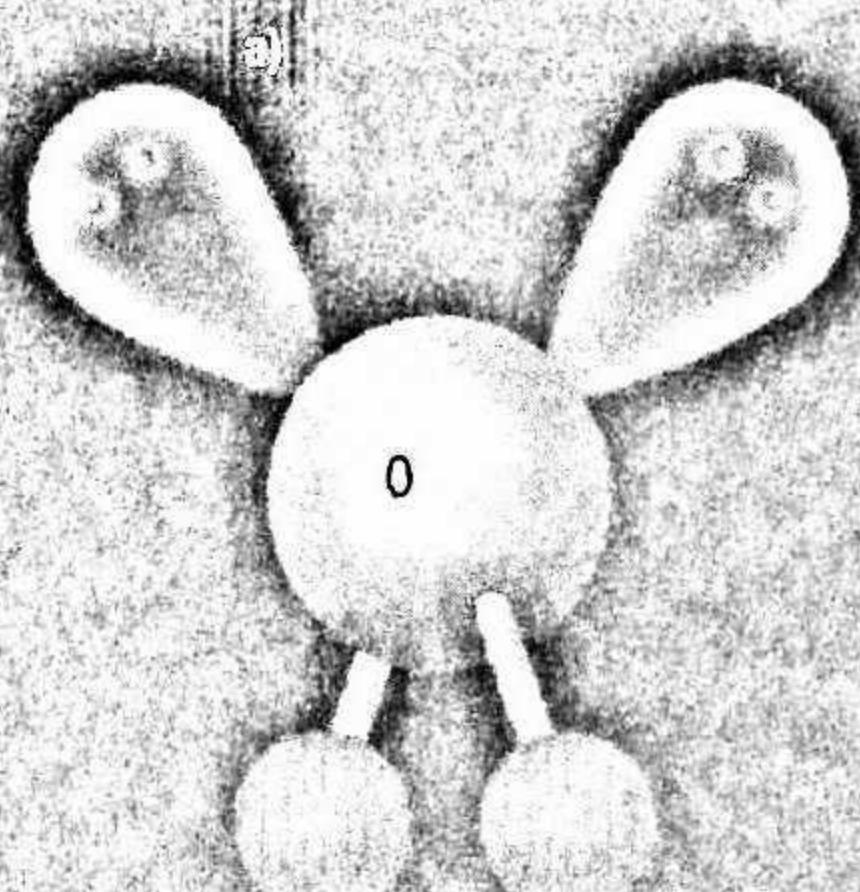
Composición de los tres isótopos del oxígeno.

$H_2^{16}O$	$H_2^{18}O$	$H_2^{17}O$	$HD^{16}O$	$D_2^{16}O$	$HT^{16}O$
18,0106	20,0148	19,0148	19,0042	19,9977	20,0188
99,78 %	0,20 %	0,03 %	0,015 %	0,022 ppm	Trazas

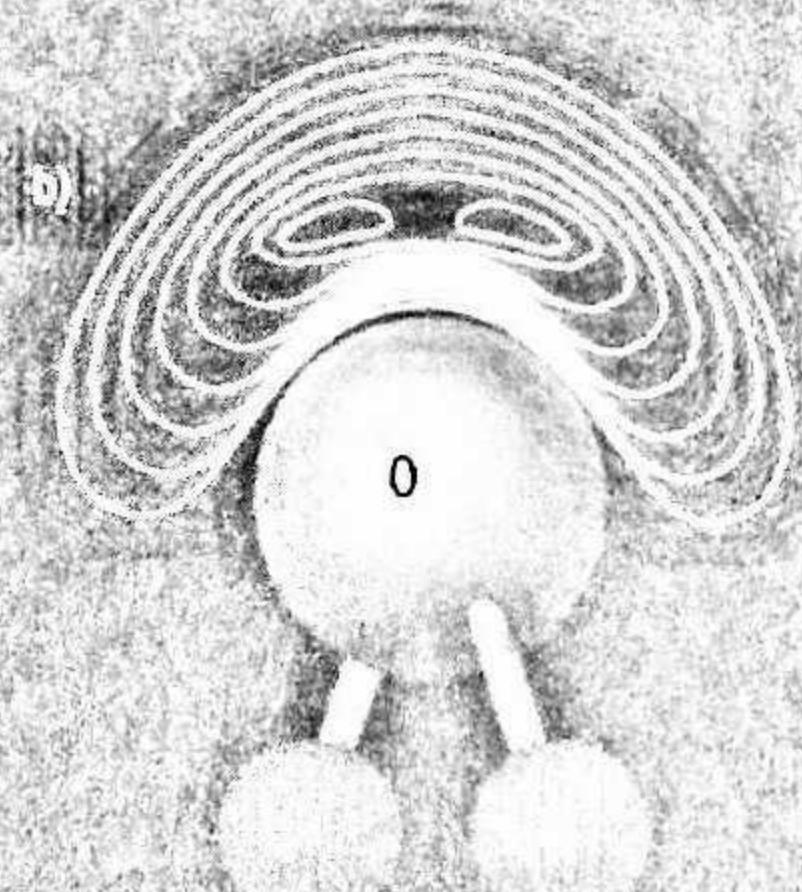
Pesos moleculares de las seis formas isotópicas más abundantes del agua y porcentaje de abundancia de cada isótopo con respecto al total del agua.

REPRESENTACIONES DE LA MOLECÚLA DE AGUA

El agua interviene de muchos modos en nuestra vida cotidiana, y estamos hechos de ella en buena parte. Sin embargo, todavía hay misterios sobre la estructura exacta de la molécula de agua que son objeto de investigación.



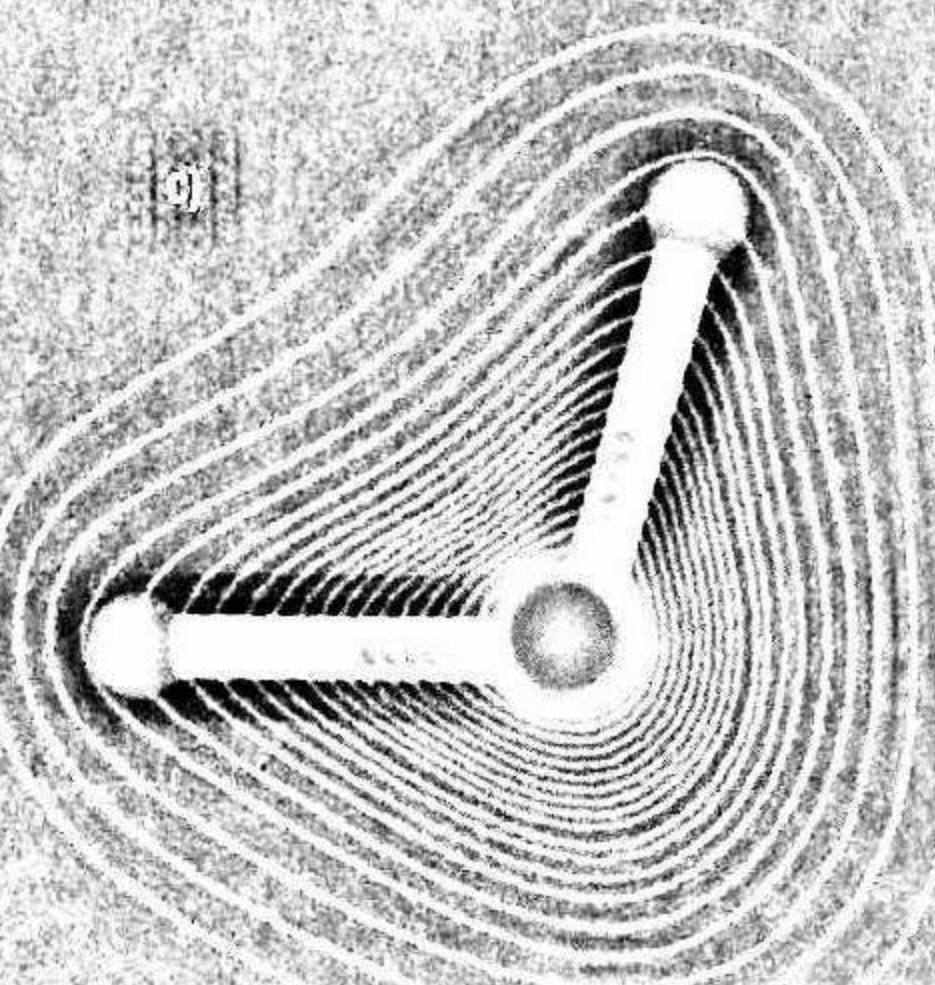
(a)



(b)

O

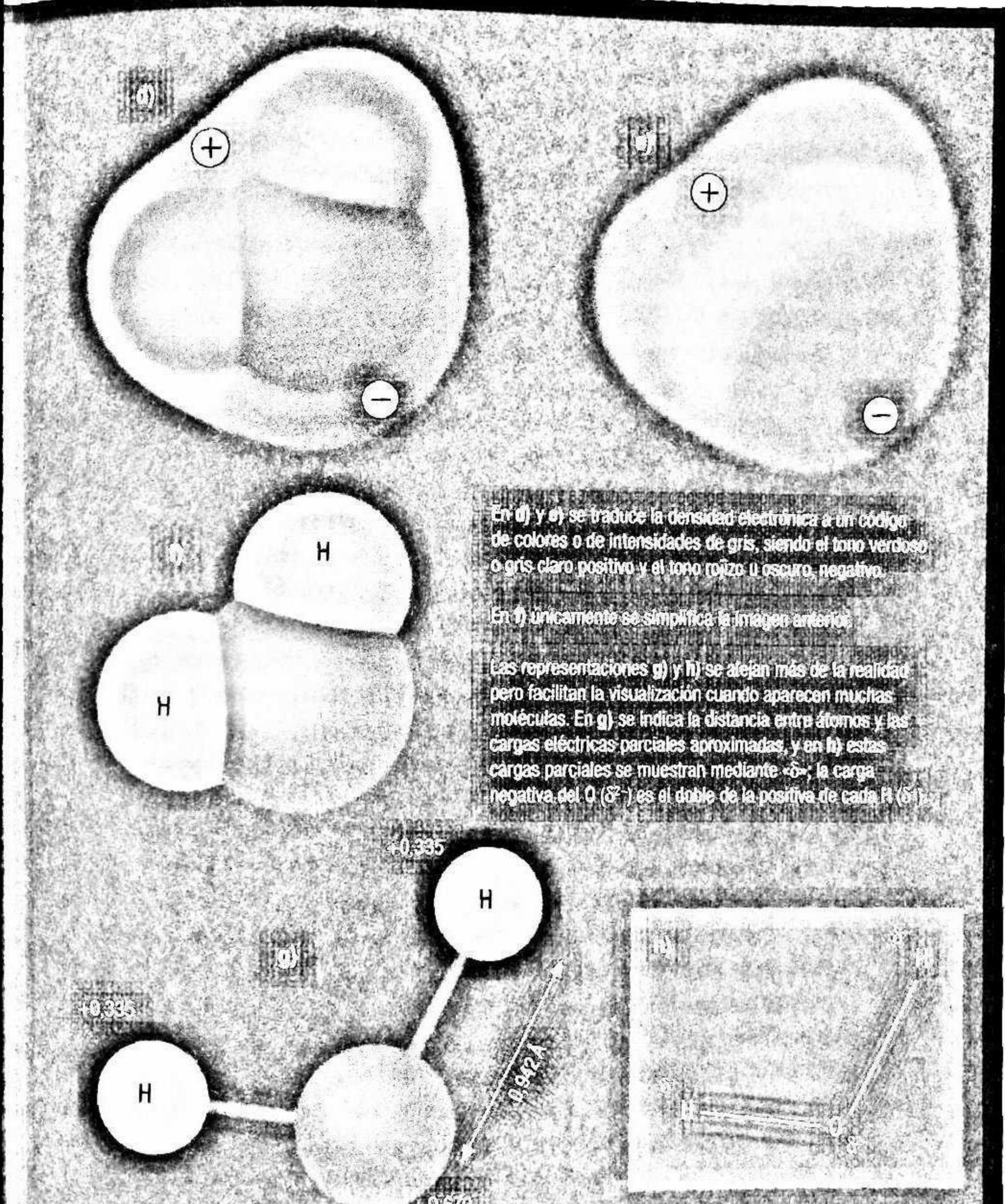
O



(c)

Los pares de electrones no enlazados del O no parecen estar realmente en estructuras con forma de orejas de conejo (a), sino «aplastados» sobre el O como se muestra en (b).

En (c), la densidad electrónica global queda reflejada en líneas más próximas (a semejanza de las isobajas de los mapas del tiempo).



(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

(k)

(l)

En (d) y (e) se traduce la densidad electrónica a un código de colores o de intensidades de gris, siendo el tono verdeo o gris claro positivo y el tono rojizo u oscuro, negativo.

En (f) únicamente se simplifica la imagen anterior.

Las representaciones (g) y (h) se alejan más de la realidad pero facilitan la visualización cuando aparecen muchas moléculas. En (g) se indica la distancia entre átomos y las cargas eléctricas parciales aproximadas, y en (h) estas cargas parciales se muestran mediante «»; la carga negativa del O (δ^-) es el doble de la positiva de cada H (δ^+).

ción la masa del electrón es insignificante, de modo que H, D y T tienen aproximadamente 1, 2 y 3 una (^1H , ^2D , ^3T).

De modo similar, existen átomos de oxígeno con (además de 8 protones) 8, 9 y 10 neutrones: el ^{16}O , el ^{17}O y el ^{18}O (véase la tabla superior de la figura 3). Pues bien, en el agua pueden encontrarse las 27 ($3 \cdot 3 \cdot 3$) combinaciones de los tres isótopos del hidrógeno (H, D y T) y los tres del O (16, 17 y 18). La mayor parte (99,78%) del agua es H_2^{16}O ; en la tabla inferior de la figura 3 tenemos la abundancia de las combinaciones isotópicas más relevantes.

En adelante nos interesarán las variantes isotópicas del hidrógeno en el agua, aunque no el tritio por ser radiactivo. De modo que nos queda, junto al H_2O , el D_2O (agua pesada) y el HDO (agua semipesada). La desigual masa de los isótopos da lugar a un comportamiento algo distinto en las reacciones químicas y a diferentes propiedades físicas. Por ejemplo, como el O tiene una masa de 16 una, la masa molecular del H_2O es 18; la del HDO, 19, y la del D_2O , 20 una. Eso hace que el agua pesada sea un 11% más densa que la ligera, y, como consecuencia, que se evapore con más dificultad y que forme un hielo que se hunde en el agua ligera. Lo que tiene un extraordinario interés es que la relación D/H en las moléculas de agua sirve como una *firma isotópica* que puede darnos pistas sobre su origen y las condiciones en que se formaron.

Por otra parte, la situación real de las moléculas de agua es mucho más «movida», pues continuamente están soltando y recuperando protones. Aunque los átomos de una molécula de H_2O concreta no suelan mantenerse juntos más de unos milisegundos, se considera habitualmente, a efectos prácticos, que el agua tiene una estructura permanente.

Unos «puentes» vitales

Si dedujéramos las propiedades del agua por extrapolación de las de otras moléculas de composición parecida, nos asombraríamos de que no hirviera en nuestro cuerpo, pues esperaría-

mos que fuera gaseosa a menos de 60°C bajo cero. En efecto, el intervalo de temperaturas (0 - 100°C) en el que el agua es líquida a 1 atm (atmósfera), óptimo para las formas de vida conocidas en la Tierra, resulta en primera instancia sorprendente por lo elevados que son ambos extremos. Los compuestos « H_2X » de los elementos de la columna del O en la tabla periódica, H_2Te , H_2Se , H_2S y H_2O , tienen, por orden de peso molecular decreciente, estos puntos de ebullición a 1 atm: $-1,8^\circ\text{C}$, -41°C , $-59,6^\circ\text{C}$ y... 100°C . Al ser el H_2O la molécula más ligera, su punto de ebullición debía ser el más negativo, inferior a $-59,6^\circ\text{C}$.

Pero también interesa la diferencia entre las temperaturas de congelación y de ebullición, o rango en el que se mantiene el estado líquido. Para ser útil para la vida, conviene que el disolvente en el que esta se desenvuelva permanezca líquido dentro de un amplio margen de temperaturas; de lo contrario, las variaciones en las condiciones de un planeta o satélite congelarían o hervirían el disolvente y los organismos probablemente perecerían. El *rango líquido* del agua (100°C) es bastante amplio, aunque se ve superado por el de la formamida y el de algunos compuestos que hierven a temperaturas más altas. De todas formas, lo más frecuente en el universo es que el agua esté helada; solo permanece líquida en una pequeña fracción de los ambientes. ¿Cómo es posible esta «anomalía» del agua, por la que se mantiene líquida a temperaturas tan altas?

El agua se sale, al menos aparentemente, de la norma en aspectos clave —que resultan importantes para la vida— debido a algo de entrada muy simple: a cómo sus moléculas se cohesionan entre sí gracias a su polaridad. Cada molécula puede interactuar, a través de sus dos regiones de cierta carga positiva, con sendas cargas negativas parciales de otras, y la región negativa, con otras positivas.

Las moléculas de H_2Te , H_2S y H_2Se , al ser el telurio (Te), el azufre (S) y el selenio (Se) menos electronegativos que el O (debido

Tres cuartas partes del universo son hidrógeno, y el oxígeno es también increíblemente abundante. Así que el H_2O es algo que puedes encontrar en todas partes.

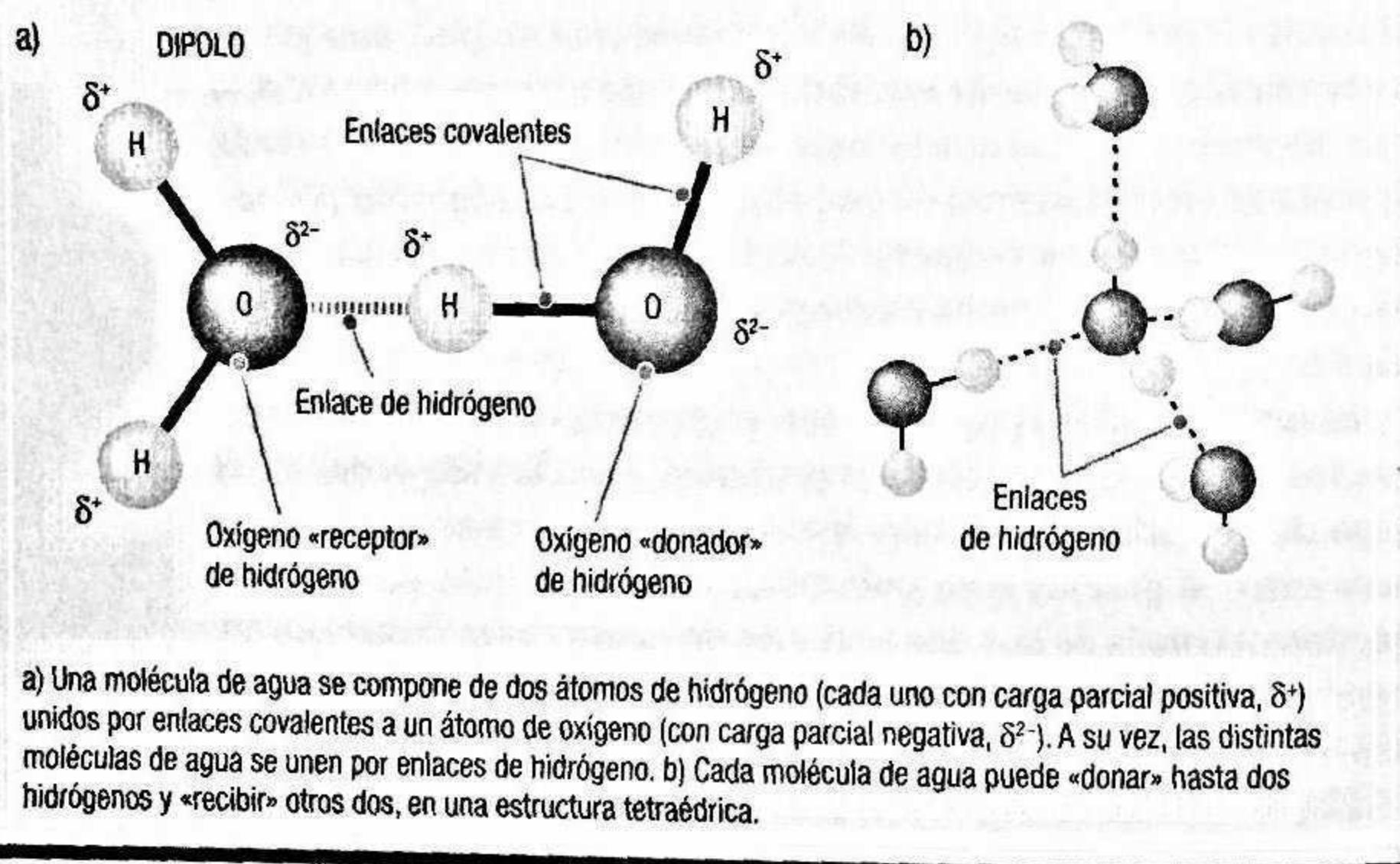
SETH SHOSTAK

a que, por ser mayores sus átomos, los electrones más externos están menos atraídos por el núcleo), forman dipolos más débiles que el H_2O , y por tanto establecen interacciones polares menos intensas.

En el H_2O , cada H está enlazado covalentemente a un O ($\text{O}-\text{H}$), pero puede ser también atraído por el O de otra molécula de agua en lo que se llama un *enlace de hidrógeno* o *puente de hidrógeno* ($\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$, con los átomos preferentemente en línea recta). Se suele indicar, mediante una línea de puntos ($\text{H}\cdots\text{O}$), que dicho enlace es mucho más débil que el covalente. En suma, cada molécula de agua es capaz de «donar» dos hidrógenos y de aceptar otros dos, con lo que puede estar asociada por puentes de hidrógeno a hasta otras cuatro, situadas aproximadamente en los vértices de un tetraedro (figura 4).

El número medio de puentes de hidrógeno por molécula de agua líquida es de unos 3,5 (pero disminuye al aumentar la temperatura). Estos enlaces son muy efímeros, no paran de romperse y formarse, con una vida media estimada de menos de 200 femtose-

FIG. 4



gundos ($200 \cdot 10^{-15}$ segundos o 200 milbillonésimas de segundo), y además son susceptibles de distorsiones estructurales. En definitiva —y como parece evidente— el agua líquida no es un cristal, pero, sorprendentemente, aún no sabemos exactamente qué es, pues no conocemos bien su estructura. En 2017, un equipo dirigido por el fisicoquímico Anders Nilsson demostró que existe no una, sino dos formas de agua líquida, de baja y alta densidad, que coexisten en algunas condiciones. Se corresponderían con las dos formas ya conocidas de hielo amorfo (no cristalino) y, a temperatura ambiente, el agua fluctuaría entre ambas. Sin duda, la profundización en esta nueva visión del agua mejorará nuestra comprensión de sus insólitas propiedades.

Resumiendo, los enlaces de hidrógeno aumentan la cohesión intermolecular del agua, y esto es lo que dificulta la vaporización (y, a temperaturas inferiores, la descongelación).

Esas fuerzas de cohesión explican, además, que el agua líquida sea tan incompresible, idónea para mantener el volumen de las células, la turgencia de las plantas, y para constituir el esqueleto hidrostático de anélidos, nematodos, equinodermos, moluscos y otros invertebrados.

La chocante —y conveniente— flotabilidad del hielo

La densidad del agua líquida varía poco con los cambios de temperatura y presión. A 1 atm, la densidad mínima la alcanza en el punto de ebullición: 0,958 kg/l. Siguiendo la norma general de que los cuerpos se contraen al enfriarse, al bajar la temperatura, la densidad aumenta poco a poco hasta llegar a un máximo de 1 kg/l a 3,98 °C. Sin embargo, al disminuir aún más la temperatura, la densidad, sorprendentemente, disminuye un poco, hasta acercarse a 0,9998 kg/l a 0 °C. Entonces, cuando se congela el agua, su volumen aumenta un 9%, por lo que la densidad experimenta un descenso brusco, hasta los 0,917 kg/l, y en consecuencia el hielo flota sobre el agua líquida. Esto es notable, pues el agua se halla entre las pocas sustancias que se hacen menos densas cuando se congelan.

La causa salta a la vista si se conocen las estructuras del agua y del *hielo Ih* (ordinario): en este las moléculas de H_2O forman una red hexagonal de geometría tetraédrica casi perfecta. En esta configuración, las moléculas —además de ser menos móviles por la menor temperatura— están menos empaquetadas que en el agua líquida, y por tanto ocupan más volumen. Si se sigue enfriando el hielo, aumenta su densidad del modo usual, pero a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ esta es aún de $0,934\text{ kg/l}$, bastante inferior a la del agua líquida.

Gracias a este fenómeno, cuando un lago o un mar se congelan, se forma una capa de hielo que flota sobre el agua líquida, en la que pueden sobrevivir los organismos. Además de este gran beneficio, la expansión del hielo también ayuda en la formación de suelos, pues al congelarse y expandirse el agua filtrada en una roca, promueve su rotura.

No obstante, no todo son ventajas; de hecho, hay un gran inconveniente. Cuando una radiación (como la solar) incide sobre una superficie, llamamos *albedo* al porcentaje de aquella que se refleja. El hielo refleja más la luz solar que el agua (tiene un albedo mayor que el de esta). Así, cuando el enfriamiento da lugar a la formación de hielo, este flota, se refleja más luz del Sol, y esto ocasiona más enfriamiento, más hielo en la superficie, mayor albedo, y mayor enfriamiento aún. Por lo tanto, que el hielo flote propicia un ciclo realimentado de enfriamiento que favorece las glaciaciones, como de hecho ha ocurrido repetidas veces en nuestro planeta.

El *Ih* es solo uno de los tipos de hielo posibles, y puede encontrarse en la naturaleza en formas diversas; el granizo, los copos de nieve, los carámbanos y el hielo del congelador son hielo *Ih*.

Los puentes de hidrógeno también hacen que haya que elevar mucho la temperatura para descohesionar el agua y permitir su ebullición. Esto ocurre finalmente si la temperatura supera los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una atmósfera de presión (1 atm), cuando el agua hierve. En el estado gaseoso, o vapor, las moléculas de agua van casi por libre gracias a que los enlaces de hidrógeno desaparecen casi por completo.

No debemos creer que lo que sabemos de la estructura del agua basta para entender sus comportamientos y propiedades. Sigue habiendo aspectos controvertidos y sin resolver, como las estruc-



Arriba, foto subacuática que muestra a varios pingüinos nadando bajo el hielo marino. La densidad del agua disminuye cuando se congela, razón por la cual el hielo flota. El agua que se encuentra junto a esta fuente termal del fondo del océano Pacífico (izquierda) sigue líquida pese a estar mucho más caliente que cuando hierve en la superficie terrestre. De hecho, aquí hay incluso dióxido de carbono líquido, pese a que su estado típico en la atmósfera, mucho más fría que este entorno submarino, es el gaseoso.

turas del agua en los microambientes celulares, por ejemplo, cuando interacciona con las macromoléculas (ADN, ARN, proteínas), y en el notable «apelotonamiento molecular» que se produce en el interior de las células. También queda mucho que aprender sobre las corrientes citoplasmáticas del medio acuoso. El agua desempeña un papel tan dinámico en el funcionamiento molecular de la vida que algunos autores la reivindican como *biomolécula*.

Cómo hervir agua a 10 °C o mantenerla líquida a 300 °C

En la cima del Everest el agua hiere a unos 70 °C, por lo que se puede tomar un café casi hirviendo sin quemarse. En cambio, en las cercanías de las fuentes termales de las profundidades marinas, el agua se mantiene líquida por encima de 300 °C. Esto se debe a que el rango de temperaturas en el que el agua (u otra sustancia) es líquida depende de la presión a que esté sujeta.

Lo que ocurre al aumentar la temperatura es que se incrementa la movilidad de las moléculas, y algunas alcanzan la energía suficiente para convertirse en gas. Si el agua está en contacto con la atmósfera, cuanta menos presión haya en esta, más fácil será que el agua se «escape» a ella, y más descenderá el punto de ebullición. Como esa presión disminuye con la altitud, no sorprende que el agua hierva en la cumbre del Everest a mucho menos de 100 °C, y a menos aún si seguimos ascendiendo.

Por otra parte, el agua se hiela a bajas temperaturas. Pero ¿qué pasa si ambas, la presión y la temperatura, son bajas? Piénsese en la superficie de Marte, con unos valores medios de -46 °C y 0,0062 atm. ¿El agua se congelará por el frío, hervirá por la falta de presión, o la suma de condiciones la mantendrá líquida?

Para responder a esta pregunta y a otras del mismo tipo se dispone del llamado *diagrama de fases* del agua, que nos dice el estado de esta a muy distintas presiones y temperaturas (figura 5). Lo primero que llama la atención en este diagrama es que por debajo de 0,006 atm no existe el agua líquida, y tampoco por debajo de unos -22 °C (de hecho, por debajo de 100 atm no hay agua líquida a menos de 0 °C). De modo que si para la vida es

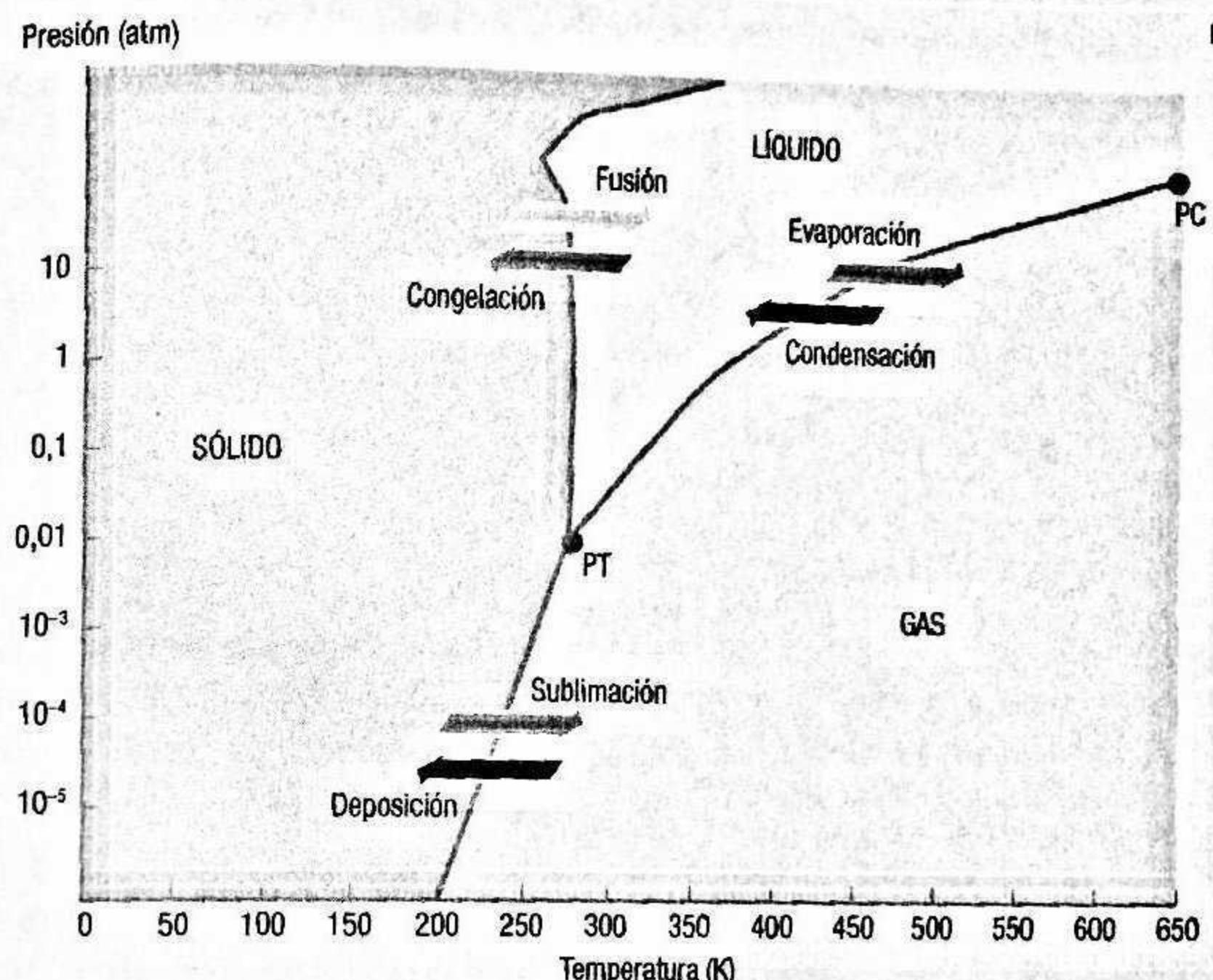


Diagrama de fases simple (sin distinguir entre distintas formas del hielo) del agua. En el eje vertical, la presión aparece en atmósferas (atm); en el horizontal, la temperatura se da en kelvins (273,15 K equivalen a 0 °C). PT: punto triple del agua. PC: punto crítico.

imprescindible el agua pura líquida, debemos eliminar de una tanda muchísimos ambientes en el universo. Para el desarrollo de la vida como la conocemos, no solo parece importante moverse en rangos de temperatura y presión que favorezcan la presencia de agua líquida, sino, además, que se establezcan ciclos entre unas fases y otras. Según lo que vemos en la Tierra, son muy interesantes las interacciones que se producen en las *interfaces* líquido-vapor y líquido-sólido.

En el caso de Marte, se sabe que su presión atmosférica media casi coincide con el citado límite de presión. De hecho, el ambiente marciano está a menudo en torno al *punto triple* del

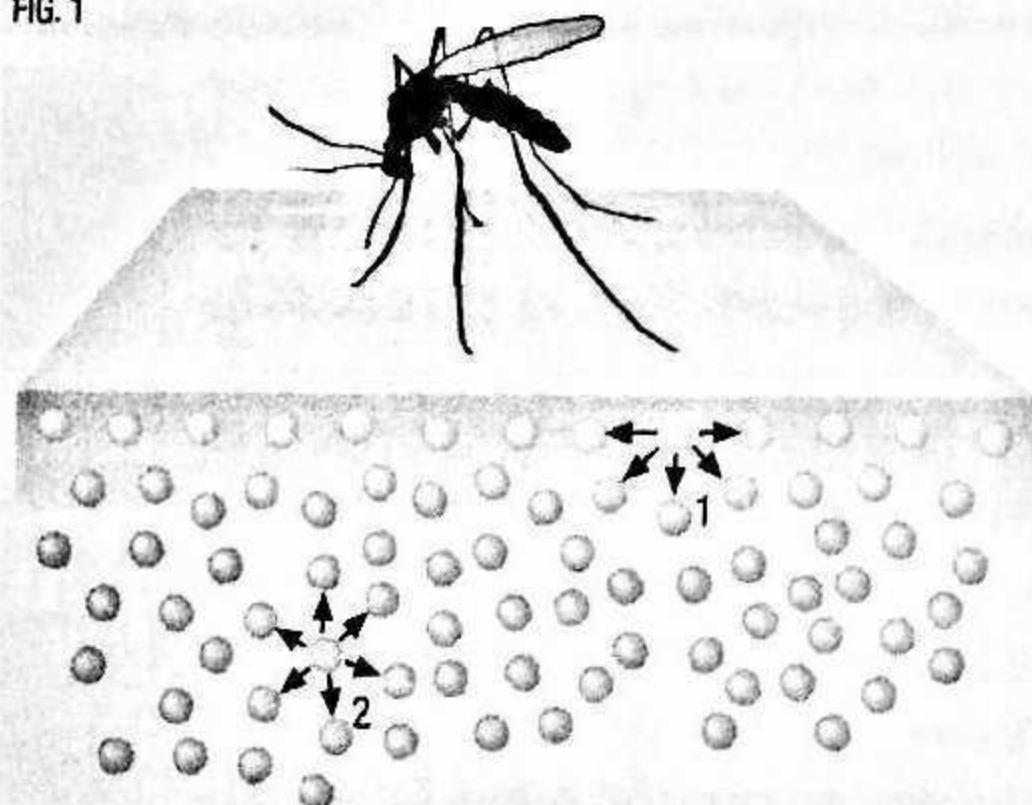
EL AGUA «TREPADORA»

La alta cohesión molecular del agua es fundamental para fenómenos tan aparentemente diversos como la formación de las gotas de lluvia o el transporte de la savia en las plantas. Se debe a que una molécula dentro de un líquido experimenta en todas las direcciones interacciones similares con otras moléculas, de modo que se anulan entre sí; pero en la superficie, al interactuar solo con las vecinas que tiene por debajo, resulta una atracción neta hacia el interior. Se genera en la superficie una tensión superficial que hace que el líquido tienda a cohesionarse y a minimizar su superficie, formando gotas (la esfera presenta un área mínima para un volumen dado) y comportándose como si fuese una membrana o película que ofrece resistencia a su deformación.

La capilaridad

Los líquidos con fuerzas de atracción intermoleculares fuertes tendrán tensión superficial elevada, siendo este el caso del agua, gracias a sus puentes de hidrógeno. El agua tiene una tensión superficial mayor que otros líquidos comunes. La tensión superficial del agua permite a algunos animales —como los zapateros o los mosquitos— desplazarse sobre su superficie a pesar de ser más densos que el agua (figura 1). El fenómeno de la capilaridad (figura 2), que contribuye al transporte de la savia contra la gravedad en las plantas vasculares, también se debe a la tensión superficial. Un líquido sube por un tubo fino (capilar) debido a que las fuerzas de cohesión entre sus moléculas son menores que las de adhesión del líquido a las paredes del tubo. El líquido sube hasta que la tensión superficial equilibra el peso del líquido que llena el tubo, y su superficie es cóncava. Por el contrario, cuando la cohesión entre las moléculas del líquido es más fuerte que la adhesión al capilar —como ocurre con el mercurio—, la tensión superficial hace que el líquido descienda, y que su superficie sea convexa. La capilaridad contribuye a la

FIG. 1



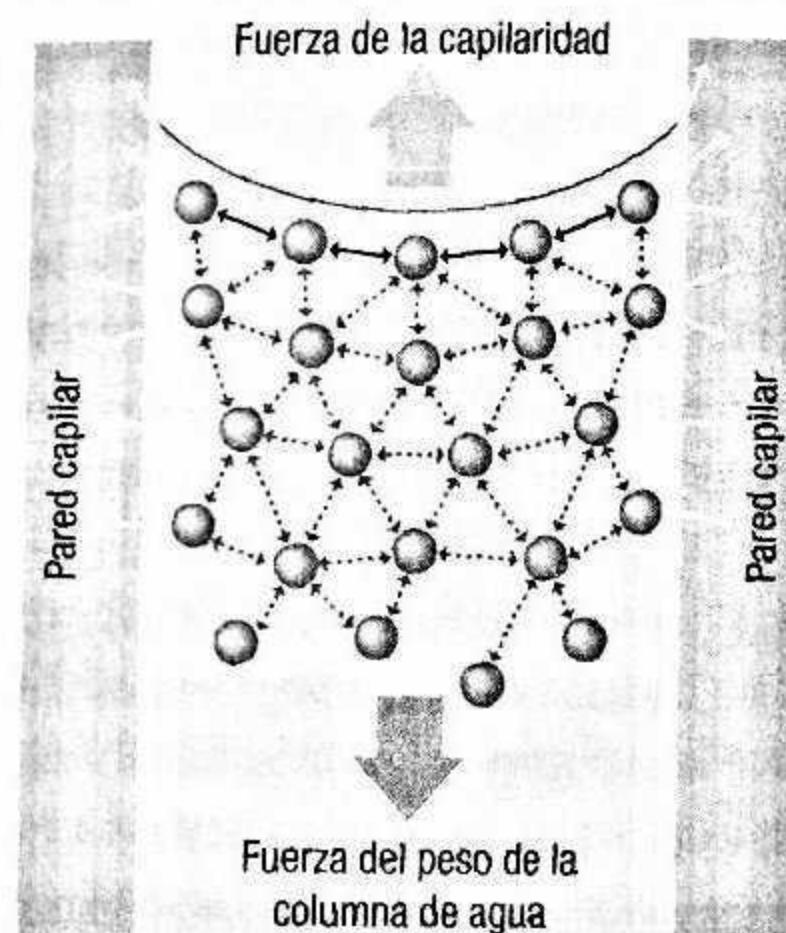
La tensión superficial del agua se debe a los puentes de hidrógeno que se establecen entre sus moléculas. En la superficie la suma de fuerzas se dirige hacia el interior y le confiere a esa superficie una resistencia a la deformación que permite soportar el peso de un insecto pequeño. 1: En la superficie del líquido, las fuerzas que actúan sobre las moléculas tienen un componente global hacia el interior. 2: En el interior del líquido, cada molécula está rodeada por otras y las fuerzas se compensan.

ascensión del agua por las plantas. El ascenso se produce también gracias a la evaporación del agua en las hojas (figura 3). Las moléculas que se evaporan tiran de otras a las que están unidas por cohesión.

Efectos en los pulmones

La capilaridad también es importante para la elevación del agua en los suelos. La elevación capilar alcanza de 2 a 5 cm en la arena gruesa, y aumenta conforme se hace más fina; en el limo llega a 1,5 m, y en la arcilla hasta más de 4 m. La elevada tensión superficial del agua también ocasiona problemas. En los alveolos pulmonares se requiere la acción de sustancias que la disminuyan —llamadas surfactantes— para posibilitar el intercambio gaseoso eficiente.

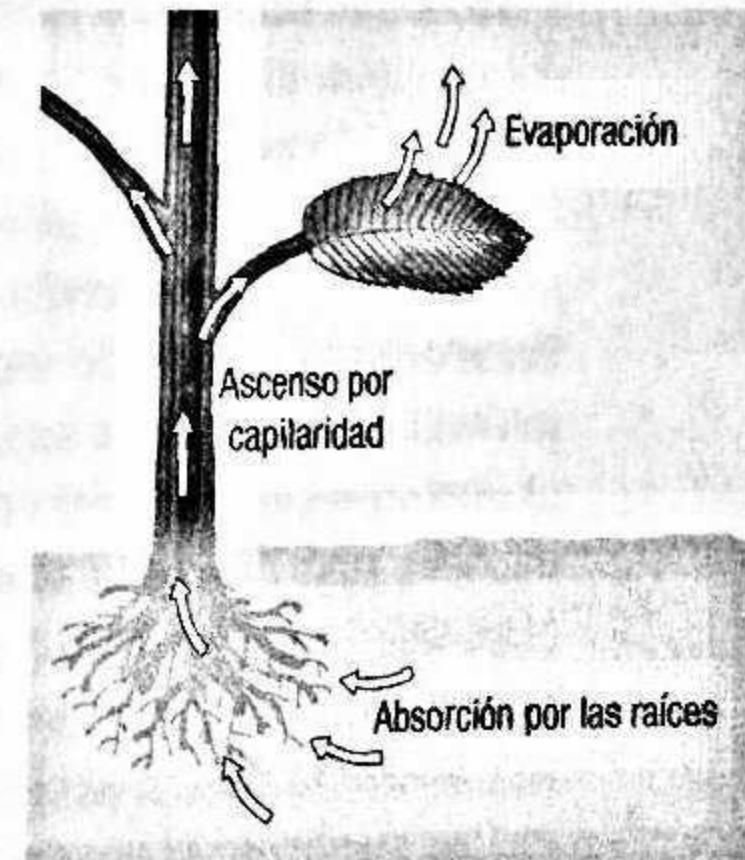
FIG. 2



Los tres pasos principales del recorrido del agua por las plantas.

La tensión superficial del agua da lugar al fenómeno de su ascensión por capilaridad, debido a que las fuerzas de cohesión entre sus moléculas superan a las de adhesión con las paredes capilares.

FIG. 3



agua, la única combinación de presión y temperatura (0,006 atm, 0,01 °C) donde coexisten hielo, agua líquida y vapor. A menos presión lo que puede haber es hielo, que si se calienta pasa a vapor por *sublimación*, mientras que si se enfriá este, solidifica por *deposición*. Pero hay que tener en cuenta que en Marte hay lugares con mayor presión y temperatura y, además, que si el agua lleva sales disueltas, puede mantenerse líquida a temperaturas inferiores (por eso se echa sal al hielo para derretirlo).

Por el contrario, a temperaturas y presiones altas (a partir de 217 atm y 374 °C, el llamado *punto crítico* del agua), no se distingue entre líquido y gas y el estado se conoce como *supercrítico*: se trata de un fluido más denso que el vapor, pero más ligero que el agua líquida. En la naturaleza, solo se ha encontrado en algunas fumarolas hidrotermales de los fondos oceánicos.

La gran reguladora térmica

Es sumamente interesante conocer no solo en qué condiciones cambia de estado el agua, sino la energía que absorbe o desprende durante estos procesos, pues tiene grandes repercusiones para la vida y para el clima.

Para que un líquido pase a gas (que tiene más movilidad molecular) debe absorber energía; se llama *calor de vaporización* a la requerida por cada kilogramo. Durante ese y otros cambios de fase (líquido a gas, sólido a líquido, etc.) no se modifica la temperatura, pues la energía solo se invierte en el cambio. El agua tiene un alto calor de vaporización debido a la energía que se necesita para romper sus puentes de hidrógeno. Esto le permite absorber mucha energía calorífica al pasar de líquido a vapor, de manera que puede bastar la evaporación de una pequeña fracción del agua presente para amortiguar un ascenso de temperatura externo. Algunos organismos utilizan este efecto cuando se refrescan mediante la transpiración.

Por supuesto, cuando el agua absorbe o desprende calor sin cambiar de fase, sí que aumenta o desciende su temperatura, pero ¿en qué medida? Nos lo dice otro parámetro, la *capacidad*

calorífica específica, que es la cantidad de calor que hay que suministrar a una sustancia, por unidad de masa, para elevar su temperatura un grado.

La capacidad calorífica del agua líquida es bastante alta —la superan pocas sustancias, como el hidrógeno, el amoniaco y el helio— debido, de nuevo, a sus interacciones moleculares: la energía que absorbe el H₂O se invierte en la redistribución de los enlaces de hidrógeno más que en la vibración atómica (que es la que hace aumentar la temperatura). Esta capacidad del agua hace que pueda absorber mucho calor aumentando poco su temperatura, lo que es muy adecuado para mantener esta sin grandes cambios, ya sea en los organismos o en los océanos. Es la causa de que haya temperaturas más moderadas en las zonas costeras que en las de interior. Estas notables características del agua son esenciales para entender cómo se generan y qué efectos producen las corrientes de agua y de aire y, en suma, para comprender la dinámica climática.

EL DISOLVENTE «UNIVERSAL»

La vida que conocemos, basada en la química del carbono, precisa un medio líquido en el que desarrollarse, y el agua parece el mejor para esa química... siempre que la presión y la temperatura, o la mezcla con otras sustancias, permitan que se mantenga líquida. Se requiere, antes que nada, para la disolución de los compuestos químicos que participan en las reacciones que sustentan la vida, propiciando de paso el transporte de nutrientes y de residuos.

Estos compuestos incluyen sales, azúcares, ácidos, álcalis, otras sustancias polares y algunos gases (como el oxígeno y el dióxido de carbono). Además, el agua se asocia a las regiones polares (con cargas, aunque sean parciales) de lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. En los intermediarios metabólicos abundan los grupos hidrófilos («amantes» del agua), bien cargados (como los derivados del ácido fosfórico), bien simplemente polares, como

Si realmente queremos encontrar un lugar para que comience la vida, ese es Marte, y si queremos un lugar para que esta florezca, ese es la Tierra.

STEVEN BENNER

los $-\text{OH}$ y $-\text{NH}_2$. Todos ellos favorecen las interacciones con los grupos polares del agua.

En ocasiones forman con ella enlaces de hidrógeno: esto sucede cuando, al igual que el agua misma, poseen grupos donadores o aceptores de hidrógenos. Pero aunque no se formen estos enlaces, el agua *hidrata* a los iones (átomos que han ganado o perdido electrones y que por tanto no son eléctricamente neutros) o a las moléculas polares asociándose, a través de sus regiones de carga parcial negativa o positiva, a las cargas positivas y negativas—respectivamente—de la molécula hidratada (figura 6). Dependiendo de las características de los iones, puede haber más o menos capas de hidratación, cada vez más difusas conforme se alejan.

JOHN EMSLEY

[El agua es] una de las sustancias químicas más investigadas, pero sigue siendo la menos entendida.

de las características de los iones, puede haber más o menos capas de hidratación, cada vez más difusas conforme se alejan.

El agua envuelve así de manera eficaz a los políiones, como los ácidos nucleicos. En este caso es muy interesante que su estructura apenas se vea afectada por los mensajes genéticos; el ADN, con una abundancia de cargas negativas debidas a grupos fosfato, tiene esencialmente las mismas características físicas y químicas, porte una u otra información genética.

Se puede considerar que el *volumen activo* de ácidos nucleicos y proteínas se extiende más allá de su límite formal, pues debe incluir las capas de agua que los rodean. La función biológica de las macromoléculas depende de su delicada interacción con ese entorno acuoso íntimo. Por ejemplo, muchas proteínas hacen uso de las moléculas de agua ligada en sus interacciones con otras proteínas o *ligandos* en general, y en sus actividades—enzimáticas u otras—.

La capacidad para disolver iones se puede explicar porque, gracias a la polaridad del agua, esta tiene una relativamente alta constante dieléctrica (k). La ley de Coulomb (llamada así en honor del físico francés que la descubrió, Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806) establece que la fuerza de interacción entre partículas cargadas es inversamente proporcional a la constante dieléctrica del medio (es decir, a mayor k , menor fuerza de atracción o repulsión). En el vacío, k es la unidad; para el hexano,

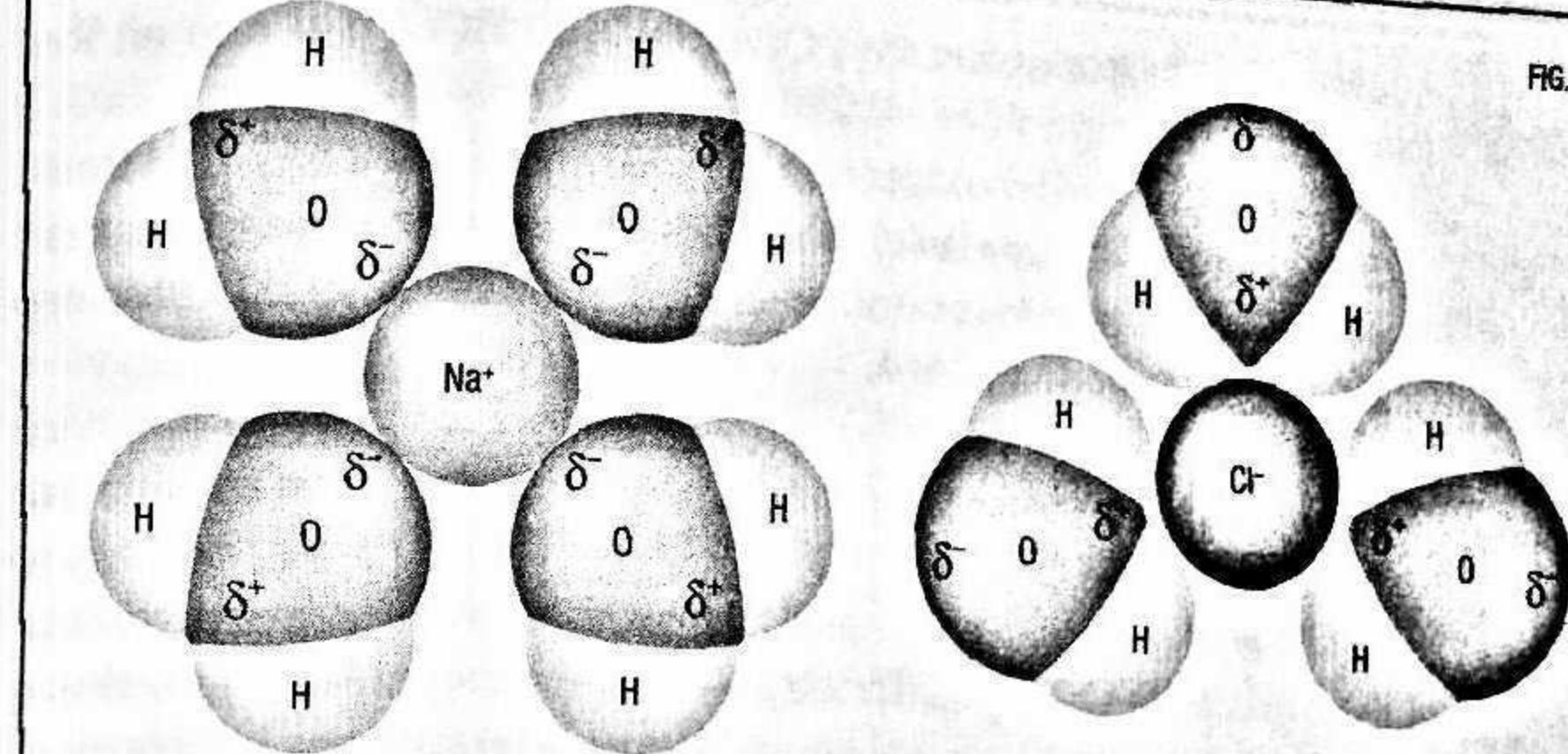


FIG. 6

Los pares de iones del cloruro sódico, NaCl , se separan en el agua y se rodean de moléculas de agua—se hidratan—. Los iones sodio (Na^+) se asocian con los O del agua, con carga parcial negativa. Los iones cloruro (Cl^-) se asocian con los H del agua, con carga parcial positiva.

1,9; para el etanol, 24,3, y para el agua, 78,5. La alta k del agua, derivada de su polaridad, hace que las sustancias formadas por asociación de partes cargadas (como la sal común, cloruro sódico) se disocien fácilmente en ella, y que todos los compuestos polares vean disminuidas sus fuerzas de atracción o repulsión. Por otra parte, la presencia de los iones disueltos incrementa mucho la conductividad eléctrica del agua que, en estado puro, se comporta como un aislante por su escasez de iones propios.

No se debe olvidar, por su importancia, la capacidad del agua—aunque sea pequeña— para disolver gases, en particular dióxido de carbono (CO_2) y O_2 . La captación oceánica de CO_2 ha sido crítica para la continuidad de la vida en la Tierra. Parte de ese CO_2 acaba depositado como caliza, con lo que se retira de la atmósfera. El perjuicio por no hacerse así se percibe en Venus, donde, por la ausencia de agua, el CO_2 se ha acumulado generando un efecto invernadero disparado y fatal.

También es importante el fácil escape del CO_2 hacia el aire. En el propio cuerpo humano, el CO_2 generado en la respiración celular se elimina con facilidad gracias, primero, a su disolución

(se forma sobre todo bicarbonato, HCO_3^-), y luego a su liberación (tras la formación de CO_2 a partir de HCO_3^-) al aire en los pulmones.

La disolución del oxígeno no es tan buena, y supone una limitación para los organismos acuáticos. En los terrestres, el transporte de O_2 desde los pulmones a los tejidos exige un mecanismo basado en la hemoglobina.

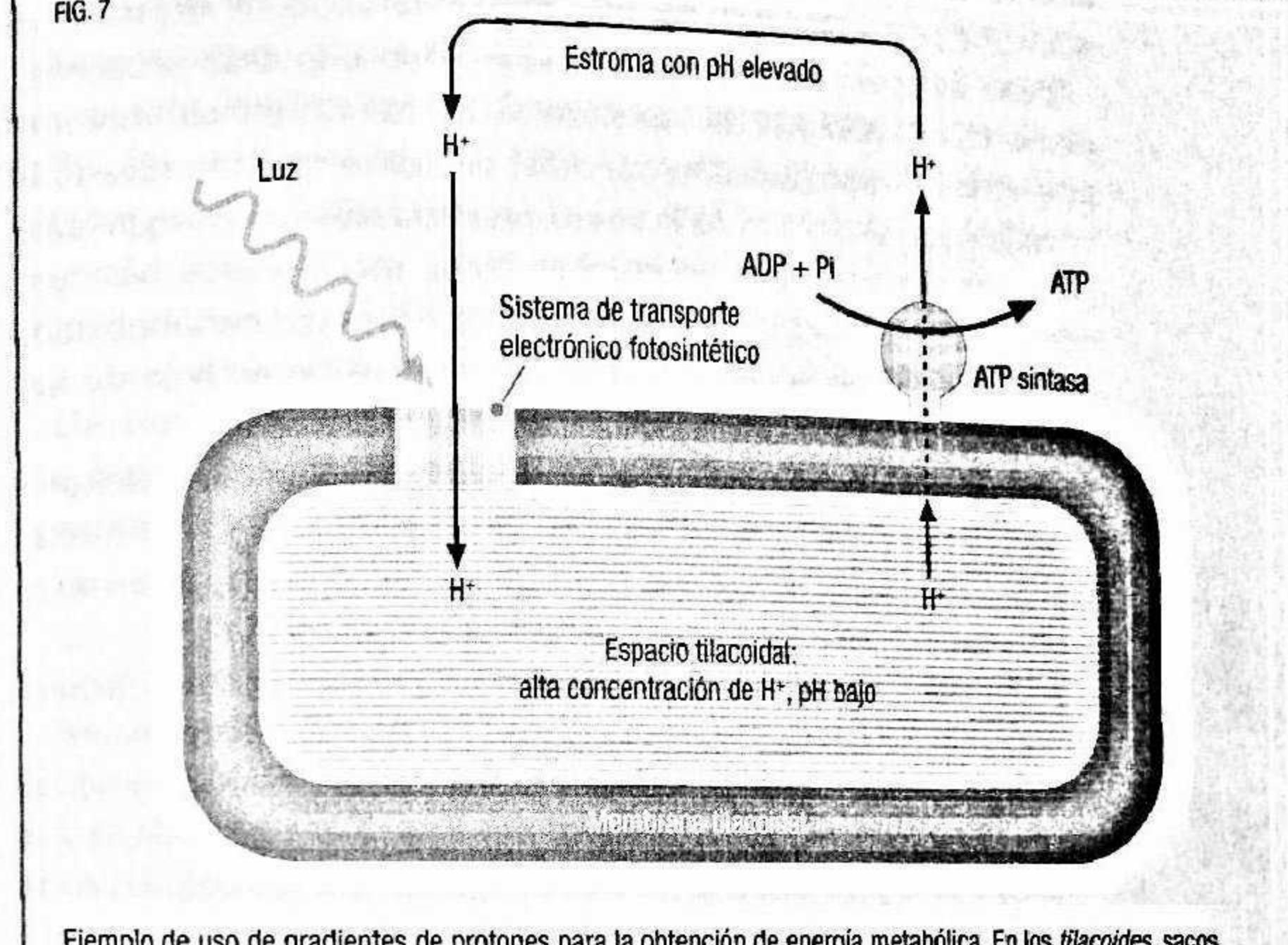
Pero en términos globales, en la biosfera hay un problema con el uso del CO_2 para la vida, debido a que es muy poco soluble en agua; su forma soluble (el bicarbonato), en cambio, es poco reactiva. La enzima que emplean los organismos fotosintéticos para incorporar el CO_2 atmosférico en metabolitos útiles (la ribulosa bisfosfato carboxilasa, o *rubisco*), que se considera la proteína más abundante del planeta, «intenta» solucionar el problema, pero, como explica el químico y biólogo estadounidense Steven A. Benner (n. 1954), entonces la reactividad problemática del CO_2 compite con la reactividad problemática del O_2 , y una fracción considerable del sustrato destinado a capturar CO_2 se destruye a través de la reacción con O_2 (en lo que se denomina *fotorrespiración*), disminuyendo notablemente el rendimiento de la fotosíntesis. Lo que parece una pifia evolutiva monumental puede explicarse por el hecho de que cuando apareció la *rubisco* el O_2 no era un problema porque aún había muy poco en la atmósfera.

A pesar de todo, el agua no deja de ser un gran disolvente, y no solo eso. Gracias a que su estructura tetraédrica dista de ser rígida, es muy buena a la hora de permitir la circulación de moléculas. Por ejemplo, los sustratos de las reacciones pueden llegar con rapidez suficiente a los *centros activos* de las proteínas, y los productos pueden salir y llegar a donde se necesiten. Sobre todo, en las condiciones de hacinamiento o apelotonamiento molecular del interior de las células.

LOS PROTÓNOS, LA CLAVE ENERGÉTICA PARA LA VIDA

Un protón (H^+) es un átomo de hidrógeno (H) privado de su electrón, es decir, el núcleo de ese átomo, que es el más pequeño

FIG. 7



Ejemplo de uso de gradientes de protones para la obtención de energía metabólica. En los *tilacoides*, sacos aplanados en el interior de los cloropastos vegetales, la energía de la luz solar se invierte en la entrada de protones, con lo que se genera un gradiente de estos. La salida de protones a favor de gradiente se aprovecha para formar ATP.

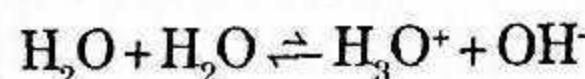
que existe. Los protones tienen, en sus movimientos, el secreto de la energía de la vida en la Tierra, pues toda la energía biológica se basa en último término en el uso de *gradientes* de protones (es decir, de diferencias de concentraciones de protones en medio acuoso) a un lado y otro de membranas. La movilidad protónica en el agua es altísima. En la respiración celular y en la fotosíntesis, la energía procedente de la oxidación controlada de compuestos y de la luz solar, respectivamente, originan un aumento de la concentración de protones a un lado de la membrana. Cuando esos protones pasan, a favor de gradiente, de nuevo al otro lado, se sintetiza ATP (adenosina trifosfato), la llamada «moneda energética» de las células (figura 7). La energía almacenada en el ATP se utiliza en multitud de reacciones (por ejemplo,

síntesis de compuestos) y procesos (por ejemplo, la contracción muscular) que requieren energía.

Pero los gradientes de protones pueden impulsar procesos, como el movimiento de los flagelos de las bacterias, directamente, sin formar previamente ATP, de modo que son más universales que el propio ATP como proveedores de energía. Los protones son cruciales en muchos otros mecanismos básicos; por ejemplo, participan en muchas reacciones del metabolismo, por lo que deben acceder o salir de los centros activos de las enzimas.

En realidad, en el medio acuoso los protones están «sueltos» en escasa medida, pues se asocian fácilmente al H_2O (se hidratan) y forman los llamados *hidrogeniones* o iones *hidronio*, H_3O^+ (también se forman multímeros tipo H_5O_2^+ y H_7O_3^+).

La misma agua se disocia espontáneamente en iones hidronio e hidroxilo (OH^-):

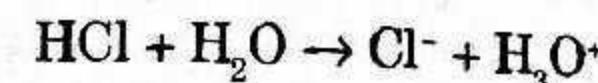


Como el agua se disocia muy poco, el producto de las concentraciones de H_3O^+ y OH^- es solo 10^{-14} M (M de molar, o moles/litro, la unidad de concentración usual en química) a 25 °C. Esto significa que por cada 556 millones de moléculas de agua pura hay un ion hidronio y un ion hidroxilo; esos iones son, además, muy efímeros, se pierden y forman con enorme rapidez. Pero esta débil capacidad del agua para generar iones es fundamental para sus propiedades y para la vida.

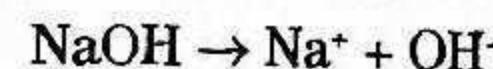
En el agua pura, las concentraciones de H_3O^+ y OH^- son idénticas (10^{-7} M cada una). Habitualmente, en vez de la concentración de protones se ofrece el *pH*, que es el exponente de la concentración de H_3O^+ en base decimal (o el logaritmo decimal de esa concentración) cambiado de signo. Es decir, que si la concentración de H_3O^+ es 10^{-7} M, el pH es 7, que indica neutralidad. Si la concentración de H_3O^+ es mayor, digamos 10^{-6} M, el pH es más bajo, 6 en este caso, y tendríamos una disolución ácida. Si el pH es superior a 7, pongamos 8 (concentración de H_3O^+ 10^{-8} M), la disolución es básica, o alcalina. El pH puede tomar valores muy

por encima y por debajo de 7 —incluso valores negativos—, pero en los seres vivos raramente se sale del intervalo 3-11.

Lógicamente, el pH del agua baja bruscamente si se disuelven en ella cantidades significativas de ácidos fuertes, que en la definición más simple son donadores de protones, o hidronios, como el ácido clorhídrico, HCl:



De modo equivalente, el pH sube mucho si lo que se añaden son bases fuertes, aceptoras de protones o donadoras de hidroxilos, como el hidróxido sódico, NaOH:



Repárese en que la misma agua es, a la vez, tanto un ácido como una base —eso sí, muy débiles—, pues, como vimos antes, se disocia en hidronio e hidroxilo. Los valores de pH muy altos o bajos causan daños celulares; entre otras cosas, «desnaturalizan» las proteínas, desactivándolas. Por eso, en el medio intracelular y, en el caso de los organismos pluricelulares, el intercelular, es esencial un buen control del pH, que en general —pero no siempre— debe estar en torno a la neutralidad. El pH se controla, en primer lugar, por la existencia en el medio de compuestos «amortiguadores», también llamados *tampones*.

El «odio» al agua también es clave para la vida

El agua es el compuesto más cercano que tenemos a un disolvente universal, pero también resulta paradójicamente crítico que «no» disuelva ciertos grupos químicos. Esta no disolución es esencial para la mismísima estructura de las células y de las proteínas que realizan casi todos los trabajos vitales, como los de catalizar las reacciones metabólicas.

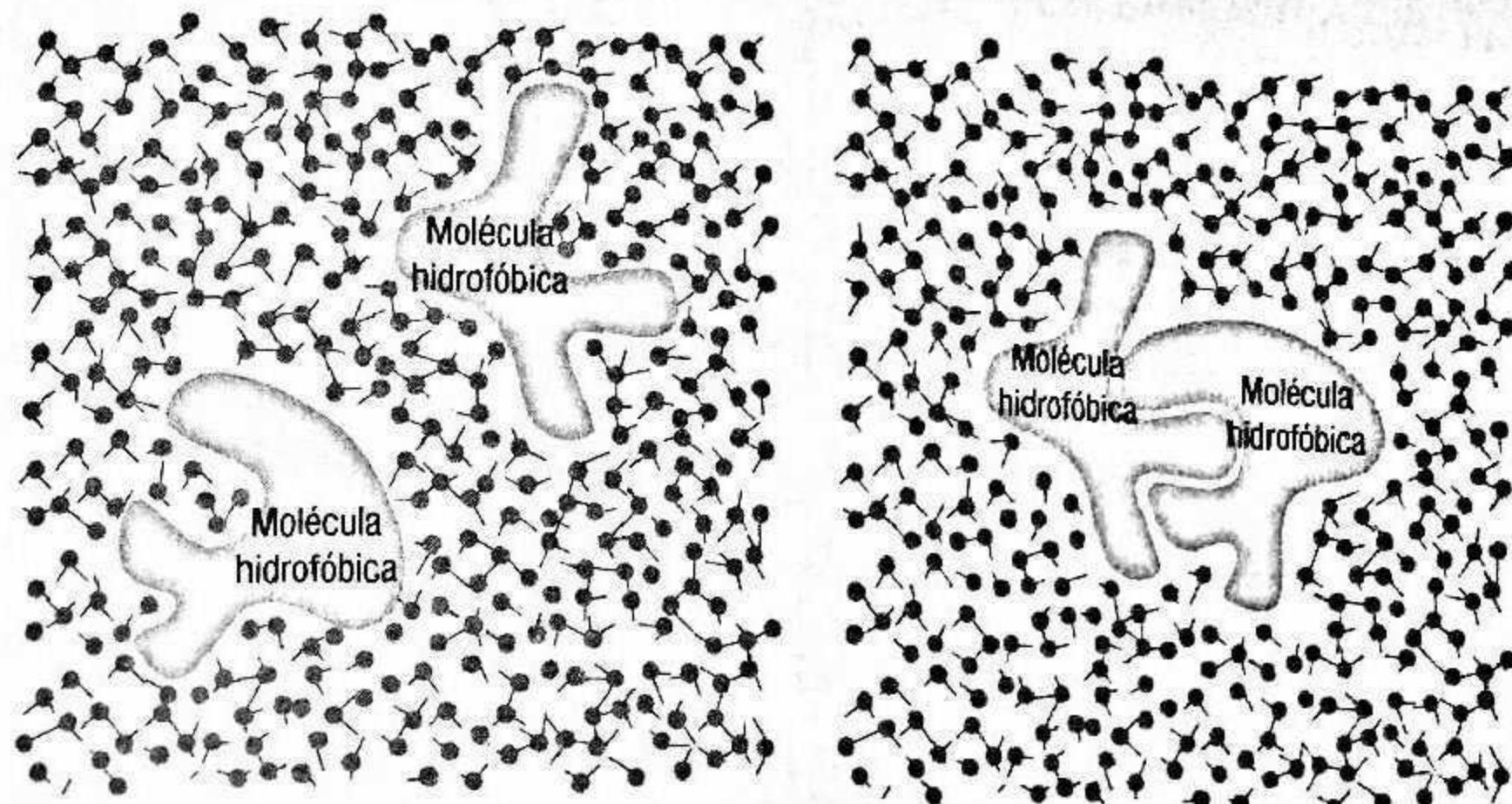
Una de las claves para entender los mecanismos de la vida es, en efecto, la «aversión» que experimentan muchas moléculas ha-

cia el agua. Se trata de moléculas que, por su apolaridad (es decir, por no tener una suficiente separación de cargas en sus moléculas), no establecen buenas interacciones con el agua polar. Se dice que son *hidrófobas*, y al fenómeno se le llama *hidrofobicidad*. Las moléculas hidrófobas tienden a asociarse entre sí en medio acuoso, pues así reducen los contactos con el agua (figura 8). Si se habla de *interacción hidrofóbica* se alude a la tendencia de los compuestos no polares a autoasociarse en un ambiente acuoso, pero no existen entre ellos enlaces hidrofóbicos.

Muchas biomoléculas no es que sean hidrófobas en su conjunto, sino que contienen una región hidrofóbica y otra hidrofílica, y por eso se las llama *anfipáticas* (que tienen «sentimientos» de un lado y otro). Entonces, en un medio acuoso se disponen o se pliegan de modo que colocan los grupos polares en contacto con el agua, y los apolares contactando entre sí. Por ejemplo, las proteínas tienden a plegarse con sus aminoácidos polares hacia el agua que las rodea, y los apolares hacia el interior de la estructura plegada. Y no olvidemos que del plegamiento tridimensional de las proteínas (en el que también participan más interacciones, como las electrostáticas y otras) dependen sus estabilidades y sus actividades, tan esenciales. Los lípidos de las membranas, por su parte, se asocian ofreciendo sus «cabezas polares» hacia el exterior o el interior de las células o sus orgánulos, ambos de naturaleza acuosa (figura 9), mientras las «colas apolares» se agrupan entre sí, sin contacto con el agua.

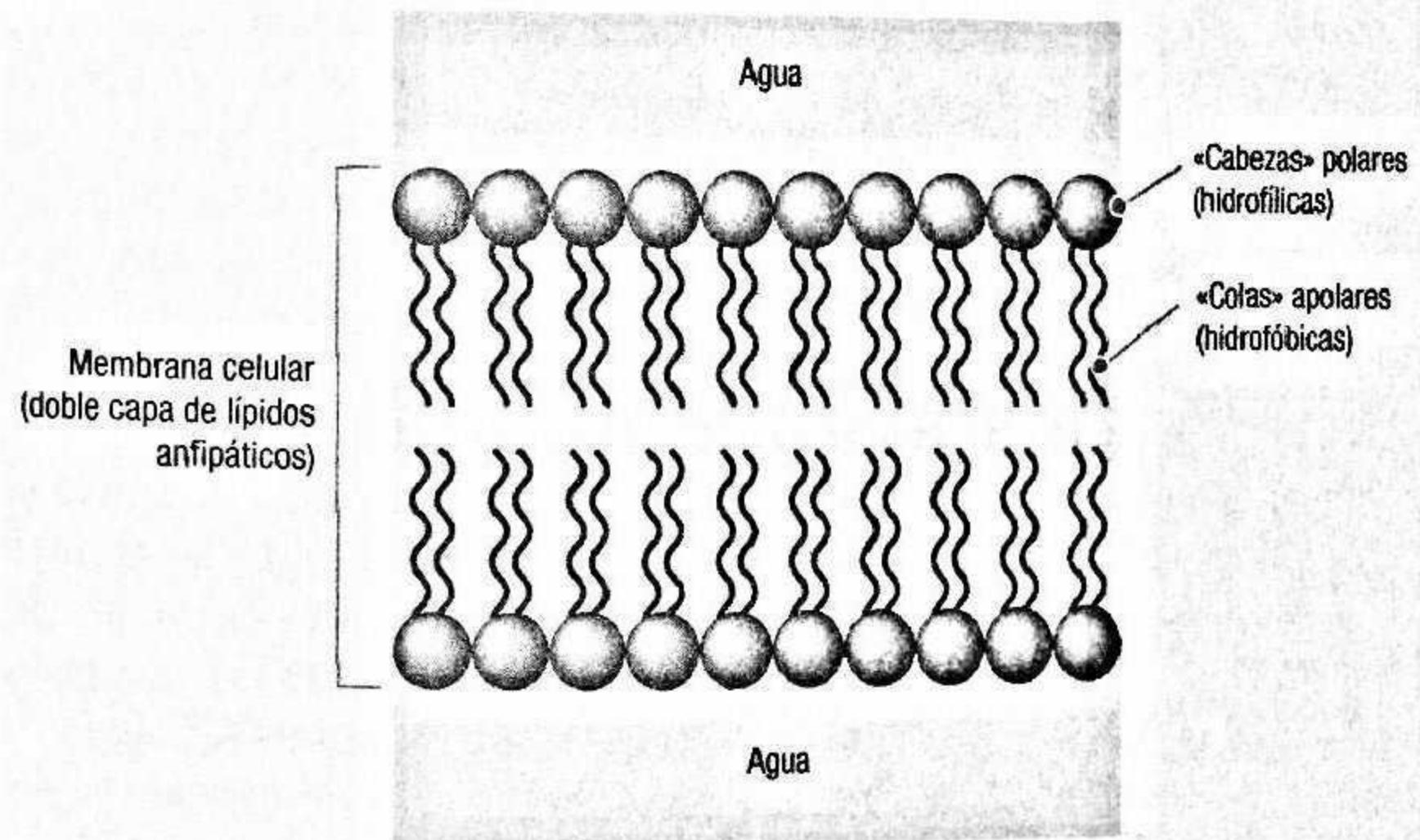
Aunque las diversas características y propiedades del agua que se han ido mencionando —y otras— también se encuentran en otras moléculas, su combinación en una sola sustancia es lo que la hace única. Por ejemplo, el amoniaco (NH_3) se asemeja al agua en algunos aspectos pero, para empezar, como su molécula tiene tres sitios donadores de hidrógenos y solo uno acceptor, no forma las redes tridimensionales características del agua líquida o congelada. Por otra parte, el dióxido de germanio, GeO_2 , y de modo más interesante, la sílice, SiO_2 , también pueden formar redes con cuatro enlaces por nodo, pero no con enlaces de hidrógeno, sino covalentes, que proporcionan una rigidez nada conveniente para la vida.

FIG. 8



Cuando se introducen moléculas hidrofóbicas en agua, se agrupan, con lo que ofrecen una menor superficie de contacto con el agua.

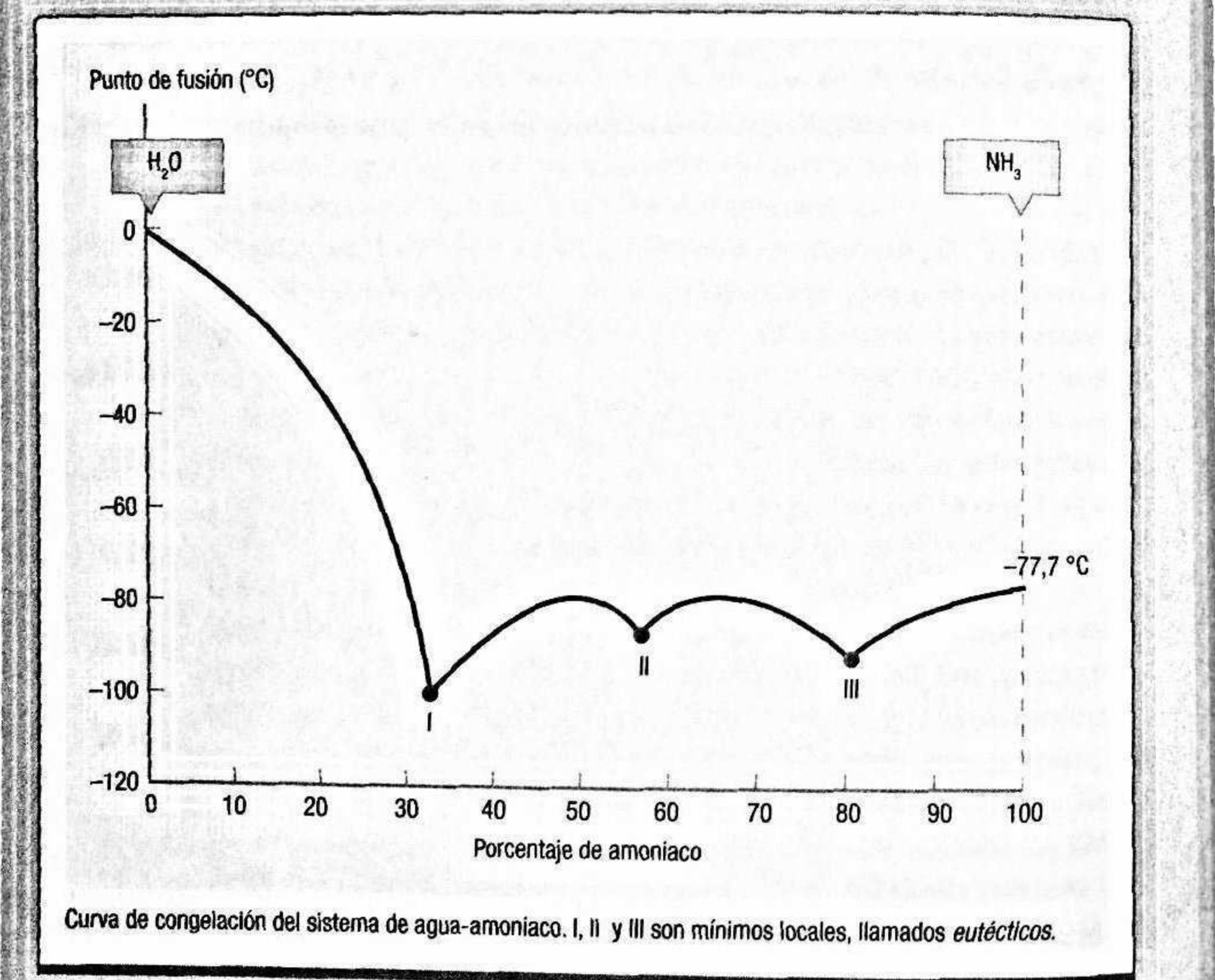
FIG. 9



En las membranas de las células, los lípidos anfipáticos se agrupan de modo que «ocultan» sus grupos apolares (hidrofóbicos) del agua, y le exponen a esta sus partes polares (hidrofílicas).

¿Y SI RESULTA QUE EL AGUA NO ES TAN BUENA?

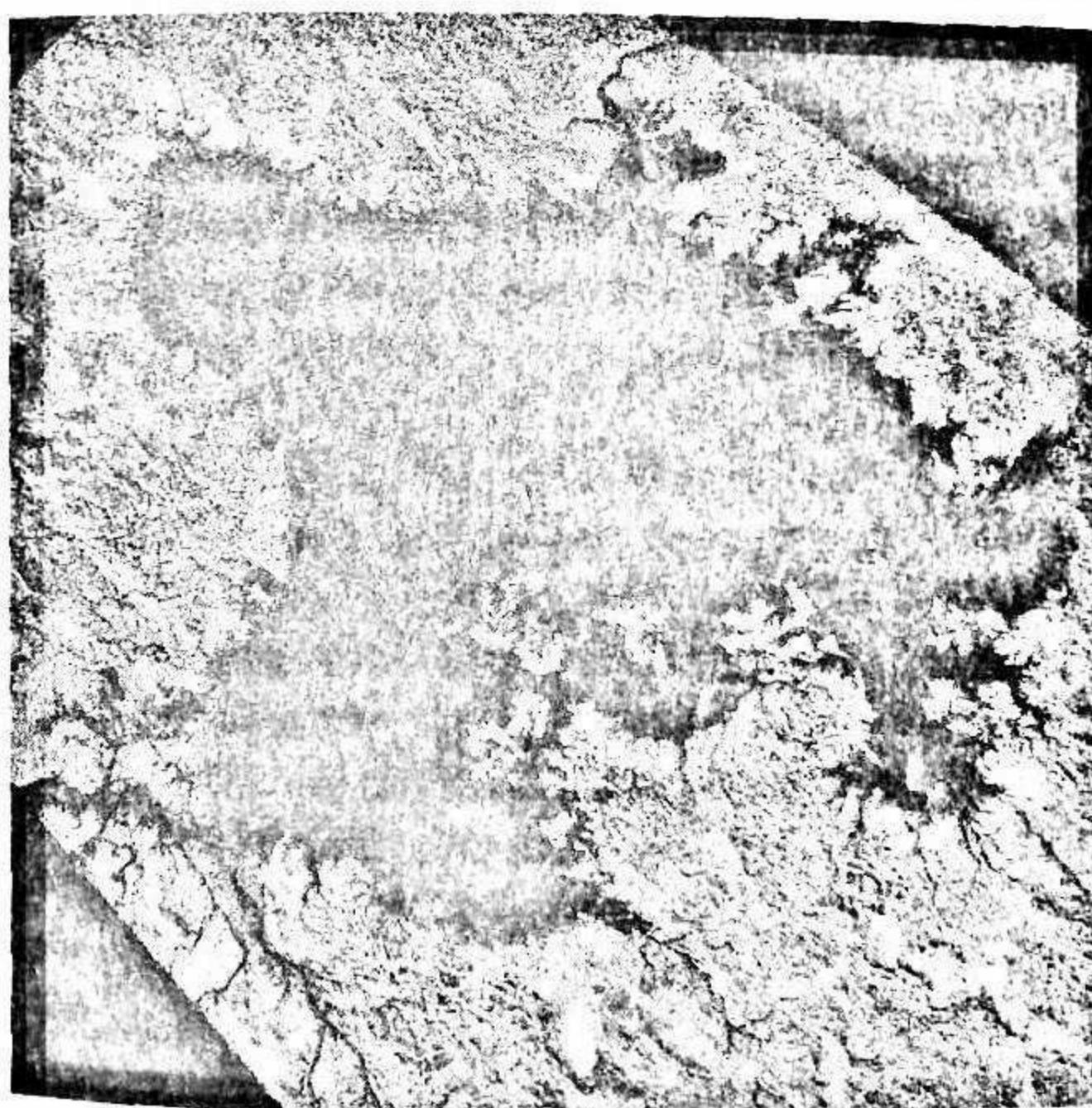
No todo son ventajas con el agua, que, según destaca Steven Benner, está manifiestamente lejos de ser óptima. Es fácil deslizarse del axioma darwiniano, según el cual la vida se ha adaptado al agua, a la suposición de que esta última está preadaptada a la vida. Existen los problemas con la disolución de gases y el grave inconveniente debido al mayor albedo del hielo flotante con respecto al agua líquida. Otras importantes desventajas ya las han señalado muchos de quienes trabajan en el origen de la vida. Las actividades hidrolíticas —de rotura de enlaces— del agua dificultan el ensamblaje y favorecen la rotura de polímeros esenciales, principalmente las proteínas y los ácidos nucleicos. El ADN tiene que ser reparado continuamente en los seres vivos a causa de la reactividad del agua. Los químicos orgánicos suelen preferir otros disolventes distintos al agua para sus reacciones. Por otro lado, en términos cósmicos, no es muy bueno para la vida que no pueda existir agua líquida por debajo de -22°C ni de 0,006 atm, por lo cual el agua líquida está escasamente distribuida en el universo.



Alternativas al agua

Se han propuesto como alternativa hidrocarburos como el etano, el cual podría funcionar, junto con otros hidrocarburos líquidos —a bajas temperaturas— en Titán, el gran satélite de Saturno. Quizá sería aún mejor un disolvente menos reactivo que el agua, la formamida. Es susceptible de hidrólisis, pero en ausencia de agua podría proporcionar un sustrato para la vida; el químico italiano Raffaele Saladino y el geólogo español Juan Manuel García Ruiz están obteniendo resultados muy prometedores a partir de formamida sobre membranas minerales —ricas en silicatos— autoensambladas. Benner llegó a decir que «si se desea afinar las propiedades del agua para hacerla más adecuada como disolvente para el origen de la vida, se podría ajustar su reactividad para hacerla más parecida a la de la formamida». El amoniaco, que es líquido en una amplia gama de temperaturas, es otro solvente posible para la vida, y es análogo al agua en muchas de sus características. Como ésta, disuelve muchos compuestos orgánicos, incluyendo muchos polielectrolitos, y en el laboratorio se realizan en amoniaco reacciones orgánicas preparativas. Con algunos ajustes, es fácilmente concebible un metabolismo en amoniaco líquido. Pero tal vez lo mejor fuese una mezcla agua-amoniaco. Estas mezclas pueden ser abundantes en el cosmos, tienen un rango de temperaturas en que son líquidas más amplio que el agua (véase la figura), y son buenas como disolventes. Benner considera incluso las posibilidades que ofrecen los planetas gigantes gaseosos, en los que sugiere una zona habitable (con la combinación presión-temperatura adecuada) sostenida por el hidrógeno (H_2). Para

Benner, el «espacio químico» de posibilidades es enorme y está muy poco explorado, por lo que no deben descartarse otros fluidos como candidatos para la vida extraterrestre. Según él, estamos careciendo de imaginación y limitándonos a lo familiar.



El mar de Ligeia, la segunda masa líquida más grande conocida en Titán, consta de hidrocarburos como el etano y el metano. La imagen, confeccionada a partir de observaciones por radar, muestra oscuro dicho mar y clara a la superficie de tierra firme que lo rodea.

El reactivo olvidado

Aunque se reconoce ampliamente que el agua líquida tiene algunas propiedades físicas y químicas inusuales e importantes, a menudo solo se la considera como el fondo inerte sobre el que se dibujan las reacciones de la vida, en todo caso un fondo a menudo moderador del pH, la temperatura y de diversas interacciones.

Se olvida frecuentemente que el agua es, además, un reactivo ubicuo, promiscuo, y a altísima concentración (55,5 M si es agua pura). Incluso fuera de los organismos, es notoria su capacidad corrosiva, pero en los seres vivos sus acciones son más sutiles y diversas. La molécula de H_2O actúa en cuatro tipos básicos de reacciones bioquímicas: las de *oxidación*, *reducción*, *hidrólisis* (rotura de un enlace mediante agua) y *condensación* (unión de moléculas con eliminación de agua). Unas de las de mayor alcance son, por supuesto, las involucradas en la fotosíntesis aeróbica, en las que se aprovechan los H del H_2O y se libera O_2 (inicialmente, por su agresiva reactividad, un «veneno», que en su momento originaría una enorme extinción).

Merece la pena destacar que el agua es un excelente *nucleófilo*, lo que significa que los pares de electrones no enlazados de sus átomos de O pueden «atacar» las cargas positivas (*electrófilas*) de otras moléculas. El agua debe considerarse, pues, como una biomolécula de pleno derecho, y seguramente la más activa (y, por supuesto, omnipresente).

En suma, se ha hecho cada vez más evidente en las últimas décadas que el agua no es simplemente el disolvente de la vida, sino algo que, merced a la profusión de tareas bioquímicas que lleva a cabo, recuerda a la «matriz» que Paracelso previó: una sustancia activa que interactúa con las biomoléculas de formas complejas y sutiles, y, en todo caso, esenciales.

El agua en la Tierra

La superficie de nuestro planeta posee casi tres cuartas partes de agua, presente también en la atmósfera, la corteza y el magma interno. Sin embargo, se resiste a desvelar su origen. Mientras tanto, el conocimiento del ciclo del agua permite avanzar en su gestión como recurso vital para toda la humanidad.

Se ha dicho que, vista desde el espacio, la Tierra más bien merecería el nombre de «Agua», pues el 71% de su superficie está cubierta de ella. Esa agua es la responsable de que, en la última foto que tomó la sonda Voyager 1 —desde los confines del sistema solar— de la Tierra, esta, apenas un píxel, tuviera un color que hizo que Carl Sagan la denominara, de manera poética e inolvidable, «un punto azul pálido».

Si el agua se extendiera de manera homogénea por este «planeta azul», el océano global tendría 2 750 m de profundidad. Sin embargo, a pesar de las apariencias, no es tan abundante, pues el agua puede representar apenas alrededor del 0,2% de la masa de la Tierra. Podríamos decir que esta última, en conjunto, está bastante reseca. Pero el agua que hay, sobre todo en la superficie, es esencial para la biología y la geología terrestres. En el interés humano respecto a qué somos y de dónde venimos, hace mucho que queremos conocer la procedencia de esa agua vital que nos rodea y que constituye unas dos terceras partes de nuestros cuerpos.

Para que se formaran los océanos terrestres hacia falta agua... y unas cuencas que la albergaran. Estas se generaron gracias a los procesos de deformación de la corteza terrestre, o activi-

dades tectónicas. El manto terrestre —entre la corteza y el núcleo— es un fluido que experimenta unos grandes movimientos de convección gracias al calor interno de la Tierra. Sobre él flotan dos tipos de materiales. El más ligero es la roca granítica, menos densa, que forma los continentes, los cuales flotan sobre el basalto, más denso, que constituye las cuencas oceánicas.

Seguir el camino del agua nos lleva muy atrás en el tiempo. La Tierra, como el resto del sistema solar, se formó hace unos 4550 millones de años mediante una agregación gravitatoria progresiva del polvo y gas constituyentes de una nube primordial, a partir de la que se generó un disco protoplanetario y posteriormente el Sol, los planetas y el resto de cuerpos del sistema solar.

¿Podemos saber si el agua actual del sistema solar estaba ya presente en la nube molecular interestelar parental? Sorprendentemente, puede que sí, gracias a que el agua lleva una firma isotópica delatora en el hidrógeno. La relación D/H en el agua superficial terrestre es, por término medio, de 1/6410, es decir que, por cada 6410 átomos de hidrógeno (del océano o del propio lector), hay uno de D. 1/6410 es igual a 0,000156, o 156 partes por millón (ppm). Ese cociente nos da la pista a seguir: lo más sencillo es pensar que la fuente del agua terrestre debería tener una relación D/H similar. Casi todo el deuterio del universo se formó, como el hidrógeno, en sus primeros minutos. El cociente D/H global que entonces se estableció habrá cambiado poco, y se estima que es aproximadamente 20 ppm. Pero localmente, en distintas zonas, se pueden encontrar valores muy dispares debido a que H y D participan con mayor o menor facilidad en diferentes reacciones, como la de formación de agua, y a que el H_2O es más volátil que el HDO y el D_2O , y el H_2 que el HD y el D_2 .

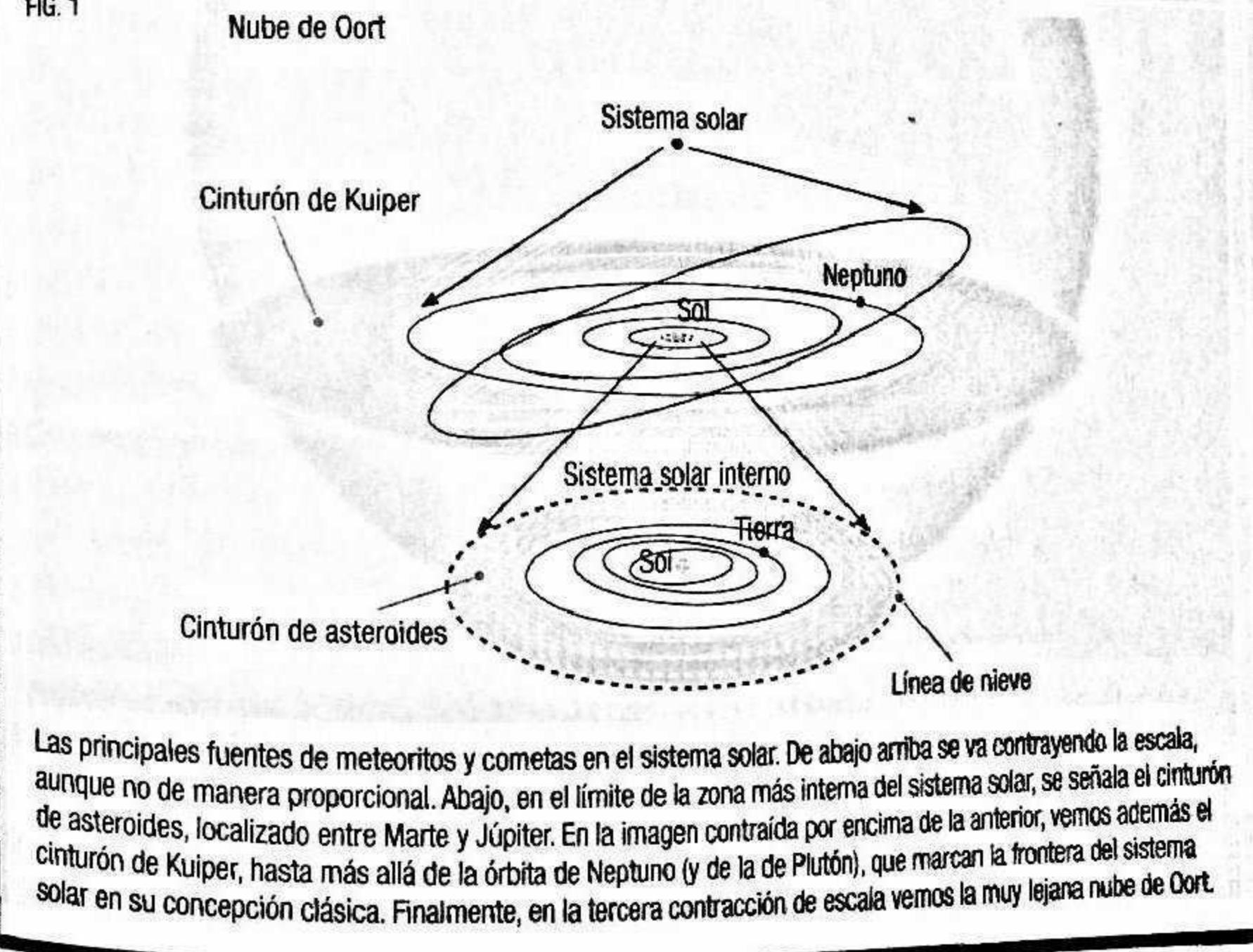
Un estudio reciente dirigido por L. Ilsedore Cleeves, astrofísica de la Universidad de Michigan (Estados Unidos), ha probado mediante un modelo que si el sistema solar hubiera formado toda el agua «desde cero», no podría tener tanto deuterio como tiene, por lo que, al menos en gran parte, el agua es anterior, y probablemente se originó mucho antes de la formación del sistema solar. Este resultado aumenta las expectativas sobre la existencia de sistemas planetarios ricos en agua.

ORÍGENES DEL AGUA TERRESTRE

La agregación gravitatoria generó cuerpos cada vez mayores, hasta formar la Tierra y el resto de componentes actuales del sistema solar. La siguiente cuestión es: ¿tenía ya la Tierra recién nacida el agua que ha llegado hasta nuestros días, o la mayor parte de esta procede de aportaciones tardías «desde fuera»?, y en este caso, ¿qué aportaciones serían esas?

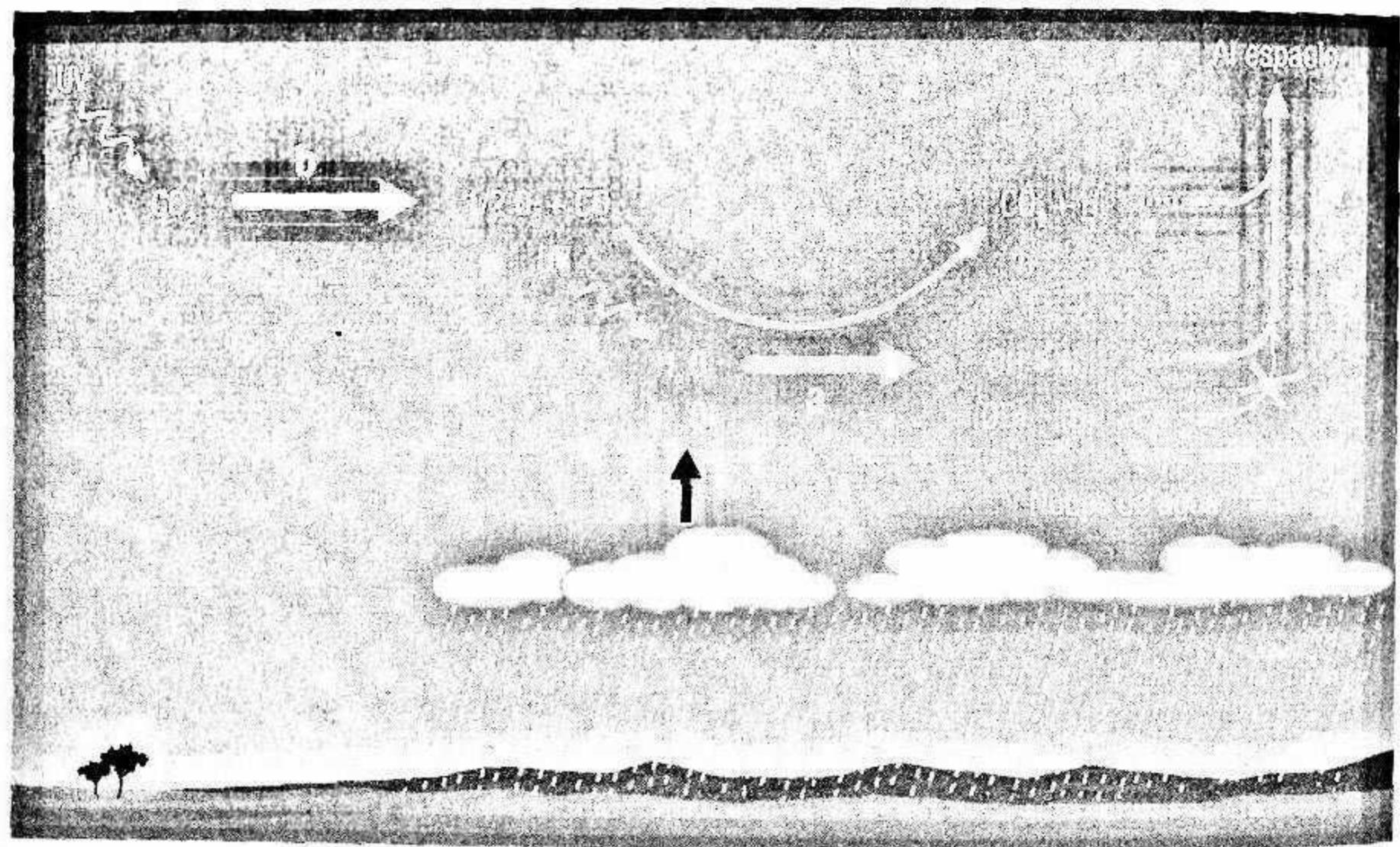
Parece que el Sol y los planetas gigantes gaseosos externos se llevaron consigo casi todo el gas, y que la mayor parte del agua quedó confinada en las regiones más exteriores y frías del sistema solar. A suficiente distancia del Sol, el agua y otras sustancias volátiles formaron hielo. La zona de transición entre el interior más caliente y seco y la región rica en hielo se la conoce como la *línea de nieve*, que ahora se localiza entre el *cinturón de asteroides* —más allá de Marte— y la órbita de Júpiter (figura 1).

FIG. 1



Pero la Tierra y otros cuerpos interiores del sistema solar también tendrían «algo» de agua. De hecho, la explicación más sencilla para dar cuenta del agua terrestre actual es, de entrada, que bastara con la que le correspondió a la Tierra, procedente del gas y el polvo de la nube protoplanetaria. Sin embargo, la Tierra recién formada sería un planeta fundido, con una temperatura tan alta que impediría la condensación de sustancias volátiles como el agua. No solo la superficie estaría muy seca, sino que el vapor de agua iría escapando al espacio con ayuda de la radiación UV (ultravioleta). Esta rompe tanto las moléculas de H_2O como las de CO_2 (entonces más abundante que ahora), y en el balance neto se pierde H_2 al espacio por ser tan ligero, bajando así la cantidad de agua atmosférica (figura 2).

FIG. 2



La rotura (o fotolisis) del agua (H_2O), indicada como proceso «a», y la del dióxido de carbono (CO_2), indicada como proceso «b», ambos producidos por la radiación ultravioleta (UV), provocan un descenso de concentración del agua y una pérdida de hidrógeno (H y H_2) al espacio. La tachadura indica que se pierde en menor proporción el deuterio (D), más pesado, por lo que el agua de la Tierra se enriquece en este. Los intermediarios de los procesos incluyen CO (monóxido de carbono), O_2 (oxígeno molecular), D_2O (agua pesada), OH (hidroxilo) y OD (hidroxilo con deuterio en vez de con hidrógeno). El CO puede reaccionar con H_2O , dando lugar a CO_2 y H_2 .

Por si eso fuera poco, diversos datos apuntan a que, con el planeta casi recién formado (hace unos 4 520 millones de años), un cuerpo del tamaño de Marte impactó contra la Tierra dando como resultado la formación de la Luna; si hubiera habido mares en aquella Tierra, habrían hervido con rapidez, con una pérdida adicional e irreversible de H del agua primordial hacia el espacio.

Se pensaba, además, que esta mala situación para el agua podría haberse mantenido durante cientos de millones de años, por lo que la mayor parte del agua actual debió de llegar más tarde, en parte por el vulcanismo, y en parte desde fuentes externas: cometas y asteroides. Al fin y al cabo, los cometas tienen, en relación con su masa, unas 200 veces más agua que la Tierra (en torno al 50% frente al 0,023%), y los meteoritos más abundantes, denominados *condritas*, unas cuatro veces más (0,1%).

Nuestra agua cometaria

Se puede sospechar que el agua habría viajado hasta la Tierra desde donde más abunda, más allá de la línea de nieve. Por eso, durante algunos años nuestros donadores de agua favoritos han sido los cometas, esas «bolas de nieve cósmica sucia», mitad hielo y mitad polvo. Hay dos reservorios principales de cuerpos convertibles en cometas en el sistema solar: el *cinturón de Kuiper* y la *nube de Oort* (véase la figura 1).

La nube de Oort es una corona esférica localizada hacia la mitad de la distancia que separa al Sol de Alfa Centauri (el sistema estelar más cercano), unas 5 000 unidades astronómicas (UA, la distancia media entre el Sol y la Tierra). Contiene billones de cuerpos, que pueden ser perturbados en su órbita y dirigidos hacia el interior del sistema solar por las interacciones estelares y la gravitación galáctica. Así dan lugar, en general, a *cometas de periodo largo*, que se acercan al Sol cada 200 años o más.

Por su parte, el cinturón de Kuiper comienza a partir de la órbita de Neptuno, a unas 30 UA. Sus cuerpos se escapan hacia el interior del sistema solar por las perturbaciones de los planetas gigantes, especialmente el citado Neptuno.

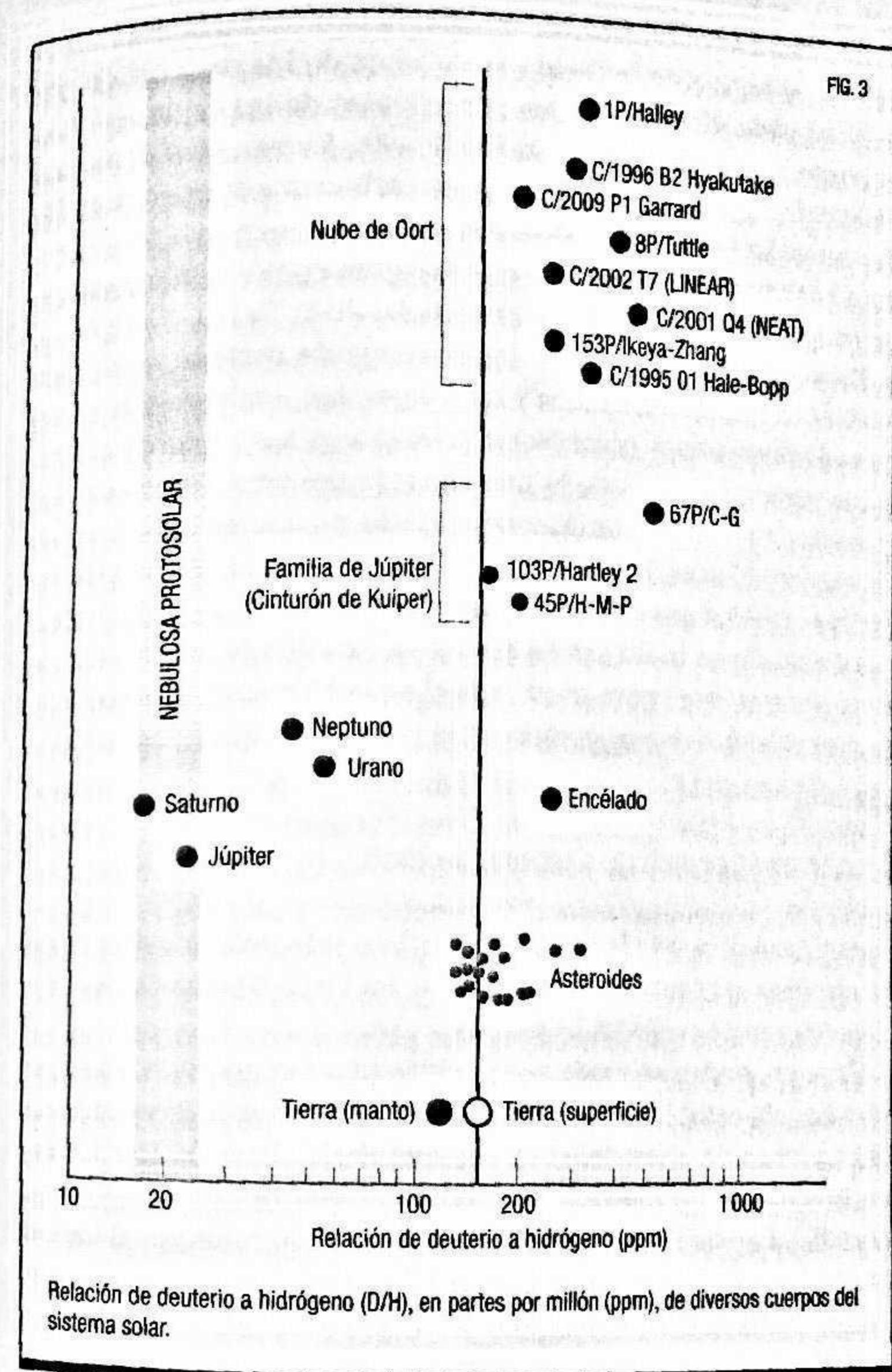
Sin embargo, la hipótesis del origen cometario del agua sufrió un revés cuando se fue hallando que cometas como los célebres Halley, Hyakutake y Hale-Bopp —procedentes de la nube de Oort— tienen una riqueza en deuterio de 310 ppm, unas dos veces superior al agua de la superficie terrestre (156 ppm). De modo que estos cometas no deben ser muy importantes en el aporte de agua a la Tierra, pues es más fácil explicar un enriquecimiento de esta en D —debido al escape preferente al espacio del H— que un empobrecimiento.

Pero aún se mantenían como posibles grandes aportadores de agua los *cometas de periodo corto*, con períodos orbitales inferiores a 20 años. Muchos de ellos ven sus órbitas muy afectadas por Júpiter, y por eso se les conoce como *cometas de la familia de Júpiter*, que probablemente proceden del cinturón de Kuiper. Cuando al fin se logró determinar, gracias al telescopio espacial Herschel, la relación D/H de algunos de estos cometas (véase la figura 3), como el Hartley 2 y el 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková, resultó que sí que tenían una proporción D/H (161 ppm) similar a la de los océanos terrestres, lo que apoyó la hipótesis de que trajeron gran parte de nuestra agua. Pero esta conjectura sufrió pronto un revés: la misión Rosetta de la Agencia Espacial Europea (ESA) encontró que otro cometa de la familia de Júpiter, 67P/Churyumov-Gerasimenko, no tiene una relación D/H como la de los océanos, sino tres veces mayor.

Como, al analizar el conjunto de los datos de D/H en el sistema solar, se percibe que, cuanto más lejos del Sol se ha formado un objeto, más deuterio contiene, se puede sospechar que el cinturón de Kuiper contiene una mezcla de cometas de orígenes variados, formados a distancias del Sol muy diferentes. Y se tiende a pensar que, aunque los cometas de ese cinturón pudieron haber aportado agua, no serían la fuente dominante.

¿Vino nuestra agua de los asteroides?

Los asteroides que han llegado y pueden llegar a la Tierra proceden en su inmensa mayoría del cinturón de asteroides. A la



Tierra arriban desde ahí sobre todo meteoritos condriticos (condritas), fragmentos de asteroides mineralógica y químicamente diversos formados a 2-3 UA del Sol.

Los asteroides del margen interno del cinturón, a unas 2 UA del Sol, constituyen la fuente de muchos de los meteoritos pobres en agua. En cambio, los procedentes de las regiones más externas contienen más cantidad de ella. Entre estos destacan las *condritas carbonáceas*, ricas en carbonatos y minerales hidratados. La mayor parte de las analizadas tienen una D/H similar a la terrestre (figura 3), lo que las sitúa como grandes candidatas a proveedoras del agua superficial de la Tierra.

En suma, los asteroides y los cometas de periodo corto (de los cinturones de asteroides y de Kuiper, respectivamente), son considerados ahora por muchos científicos los mejores candidatos para dar cuenta de la mayor parte del agua terrestre. Sin embargo, recientemente ha asomado la posibilidad de nuevos «invitados» al aporte de agua a la Tierra. El planeta enano Ceres (del que se desconoce su relación D/H) tiene 900 km de diámetro, y la mitad de su masa puede ser agua. Se calcula que bastarían unos cinco «ceres» para traer toda el agua terrestre, y ese tipo de objetos era mucho más común en el sistema solar en formación.

O tenemos agua nativa, después de todo

Para animar aún más la controversia, la visión del agua de origen extraterrestre relativamente tardía se ha visto desafiada muy recientemente por nuevos hallazgos.

Hace unos años se creía que nuestro planeta no pudo albergar agua líquida estable sobre la superficie hasta que no tuvo más de 500 millones de años de edad. Sin embargo, del estudio de ciertos cristales —de circón— se concluyó que hubo agua líquida superficial en la Tierra mucho antes, unos 150 millones de años tras su formación. Según un estudio de 2017 dirigido por Antony Burnham, de la Universidad Nacional de Australia, en esa época la Tierra tenía muy pocas elevaciones y estaba casi totalmente cubierta de agua. Incluso hay indicios de que hubo agua en la Tierra virtualmente desde sus comienzos.

En 2015, la investigadora Lydia Hallis, de la Universidad de Glasgow y del Instituto de Astrobiología de la NASA en Hawái,

lideró un grupo de científicos en busca de esa agua primordial. En la isla de Baffin, del archipiélago ártico canadiense, y en Islandia, examinaron unas lavas solidificadas que probablemente estuvieron aisladas de la superficie durante casi toda la historia de la Tierra, por lo que debieron retener compuestos químicos primitivos, con una relación D/H más similar a la del agua primordial. Pues bien, esa relación ha resultado ser un 20% menor que la de los océanos terrestres, tan baja que, según los autores, no puede proceder de asteroides o cometas, y se acerca en cambio a la de la nebulosa protosolar.

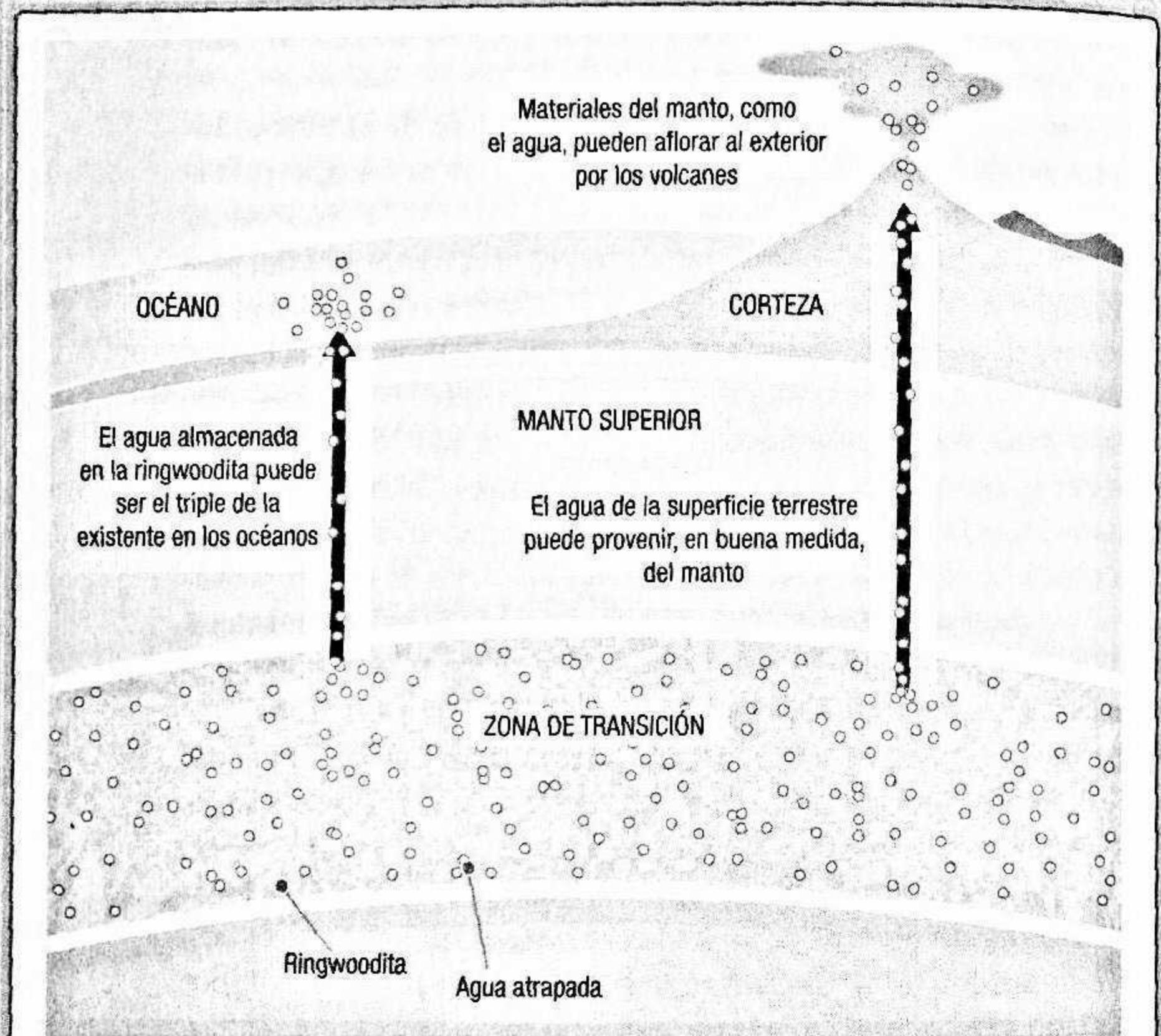
Según Hallis, la relación D/H en la superficie de la Tierra aumentó desde la formación del planeta debido al escape preferente de los átomos ligeros de H (véase la figura 2). Aunque se perdiera mucha agua superficial en la historia temprana del planeta, pudo restituirse a partir de la gran reserva interna del manto terrestre mediante la actividad volcánica, y sería innecesaria la hipótesis de que el agua provino de asteroides y cometas.

Se espera que el magma más profundo, a 600-2800 km de la superficie, tenga una relación D/H aún menor, al librarse del proceso de mezcla debido al ingreso de nueva agua al manto cuando una placa de la corteza se sumerge bajo otra en lo que se denomina *subducción*. Probablemente conservará la relación inicial D/H de las moléculas del agua primordial, la que vino adsorbida al polvo y como parte del gas, los cuales formaron la Tierra. El manto terrestre contendría aún grandes cantidades de esa agua, seguramente ligada a minerales, que nunca ha escapado a la atmósfera a través de los volcanes. Por cierto, esa conservación del agua en el proceso de formación planetaria sugiere que pueden abundar en el universo los planetas ricos en agua.

En definitiva, aún faltan muchos datos y estudios para tener una buena visión del origen del agua de la Tierra y de nuestros propios cuerpos. Probablemente sea una historia compleja, con una mezcla de procedencias y avatares que habrá que resolver con muchas más mediciones isotópicas de las diversas fuentes, y seguramente algo más que los datos de relaciones D/H. Todavía queda mucho que averiguar sobre el origen del agua que nos rodea y nos constituye.

¿EL OCEÁNO SUBTERRÁNEO DE VERNE?

Puede ser que las mayores reservas de agua del planeta no se encuentren en la superficie, sino a bastante profundidad. En 2014, el equipo de Graham Pearson, de la Universidad de Alberta, en Canadá, analizó un pequeño diamante descubierto en el estado de Mato Grosso (Brasil) y halló un mineral, la ringwoodita, que hasta ahora solo se había encontrado en meteoritos. Únicamente puede formarse a profundidades de entre 410 y 660 km, en la llamada zona de transición entre el manto superior y el inferior. Lo importante es que el mineral es una especie de «esponja



La figura ilustra, de manera simplificada, cómo el agua asociada a la ringwoodita pudo contribuir a la que hoy tenemos en la superficie de la Tierra. Este importante aporte de agua, desde la zona del subsuelo profundo que es rica en ese mineral, hace menos necesario recurrir a la procedente de cometas y asteroides cayendo a la Tierra de manera profusa en la infancia de nuestro mundo para explicar la abundancia de agua en la superficie.

de roca» que contiene un 1 % de agua. Puede parecer poco, pero la ringwoodita es mayoritaria en esa inmensa zona de la Tierra, y ello significa que puede haber una enorme cantidad de agua atrapada en los minerales que la conforman. Cuando la ringwoodita se ve empujada a más y más profundidad por las actividades tectónicas, empieza a fundirse y a liberar agua, que puede llegar a ascender a la superficie. Se estima que la zona donde se halla la ringwoodita podría contener hasta el triple de agua que los océanos (y el manto completo, hasta el 85 % del agua terrestre). Esto apoya, de paso, las propuestas de Lydia Hallis sobre la importancia del agua terrestre nativa frente a la exógena. Claro que, lamentablemente, no es un agua que se pueda aprovechar con las tecnologías actuales, pero, según Pearson, «una de las razones de que la Tierra sea un planeta tan dinámico es la presencia de un poco de agua en su interior».

Ni océano ni lagos

En 2016, un estudio de investigadores rusos y franceses encabezados por Alexander V. Sóbolev confirmó esos resultados estudiando komatiitas, un tipo raro de rocas volcánicas formadas a muy altas temperaturas y presiones hace unos 2 700 millones de años. La hidratación de estas rocas revela un manto hidratado y muy antiguo. Lamentablemente, los hallazgos de 2014 y 2016 se difundieron con titulares del tipo «Científicos descubren un enorme océano subterráneo», incluso aludiendo a la verosimilitud de la ficción de Julio Verne *Viaje al centro de la Tierra*, pero lo que se presume que hay en el manto terrestre dista de poder conformar ni un simple lago, pues se trata de agua atrapada en minerales. En cuanto al núcleo de la Tierra, contiene hidrógeno y oxígeno, pero las condiciones extremas de presión y temperatura impiden la formación de agua.



Graham Pearson sosteniendo el diamante con ringwoodita y la imagen ampliada del mismo, hallado en Brasil.

SUPERFICIE TERRESTRE: MUCHA AGUA, PERO MUCHA SED

El agua que, en cualquiera de sus estados, hay en la superficie de nuestro planeta, incluida la subterránea de la corteza —pero no la del manto—, constituye la *hidrosfera*, y es la que experimenta la dinámica del llamado *ciclo del agua*, que nos afecta de lleno.

Se calcula que en la hidrosfera hay unos 1 386 millones de kilómetros cúbicos (km^3) de agua (véase la tabla). Como se ha dicho, si la Tierra fuese plana, estaría totalmente cubierta por una capa de agua de unos 2 750 m, pero su distribución no es tan uni-

Distribución del agua en la hidrosfera				
Situación del agua	Volumen en km^3		Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada	de agua dulce	de agua total
Océanos y mares	—	1 338 000 000	—	96,54
Casquetes y glaciares polares	24 064 000	—	68,70	1,74
Agua subterránea salada	—	12 870 000	—	0,93
Agua subterránea dulce	10 530 000	—	30,06	0,76
Glaciares continentales y permafrost	300 000	—	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91 000	—	0,26	0,007
Lagos de agua salada	—	85 400	—	0,006
Humedad del suelo	16 500	—	0,05	0,001
Atmósfera	12 900	—	0,04	0,001
Embalses	11 470	—	0,03	0,0008
Ríos	2 120	—	0,006	0,0002
Agua biológica	1 120	—	0,003	0,0001
Total agua dulce	35 029 110		100	2,53
Total agua en la Tierra	1 386 000 000			100

Distribución del agua en la hidrosfera. Esta tabla ofrece datos sobre dicha distribución, referentes al agua dulce y salada, por un lado, y al agua líquida, sólida y atmosférica, por otro.

forme. Ni su estado: de esa agua superficial, el 97,5% es salada, y se halla sobre todo en los océanos y mares.

Esto es un problema para nuestra especie, que es de las que necesitan agua con poca sal («dulce») para sobrevivir. Beber agua del mar puede matarnos por deshidratación. No obstante, en los líquidos intra e intercelulares, como la sangre, mantenemos unas concentraciones salinas que rememoran, aminoradas, las de los iones marinos; incluso cada uno de nosotros inicia su vida en un «pequeño océano» que recrea el útero materno. Requerimos, como los demás organismos, un control exquisito de la «fuerza iónica» presente en los distintos ambientes intra e intercelulares, y de las presiones (llamadas «osmóticas») que se originan a través de las membranas; una célula en un medio demasiado diluido podría explotar, y en otro demasiado salino, deshidratarse y morir.

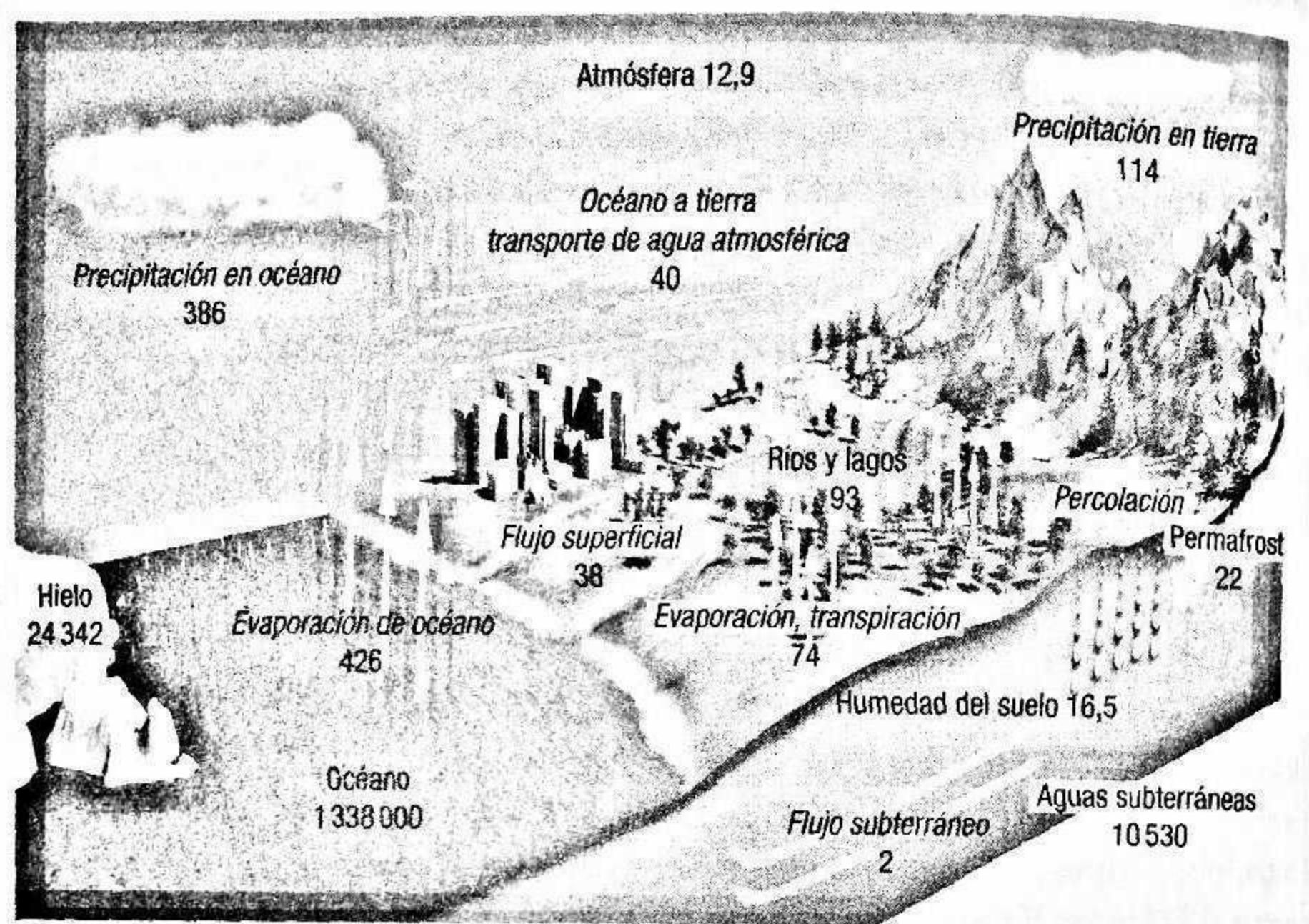
Aunque las reservas mundiales de agua dulce superen los 35 millones de km^3 , con los que se podría llenar diez veces el mar Mediterráneo, solo representan el 2,5% del total. Puede parecer un mal dato, pero en realidad es mucho peor, pues menos de la tercera parte de ella es líquida (menos del 1% respecto al total; el hielo está sobre todo en los glaciares y casquetes polares). Y casi toda el agua líquida se encuentra en acuíferos subterráneos. De modo que las principales fuentes de suministro —ríos, lagos y embalses— constituyen el 0,3% del agua dulce, y unos 7/8 se concentran en el lago Baikal (Rusia) y los grandes lagos de América del Norte.

Hay que señalar que estos datos varían con el clima. Durante la última era de hielo, hace unos 18 000 años, se calcula que un tercio de la masa terrestre continental estaba cubierta por hielo. También merece destacarse que aunque el agua en la atmósfera representa menos de un 0,001% del agua de la superficie, su papel es muy importante para el clima.

EL CICLO DEL AGUA Y LA «CINTA TRANSPORTADORA»

El ciclo del agua, o *ciclo hidrológico* (figura 4), describe el movimiento y los cambios de estado del agua sobre la superficie

FIG. 4



El ciclo del agua en la Tierra. Estimación de los principales reservorios (letra redonda) y flujos (letra cursiva) de agua en la superficie y la atmósfera de la Tierra. Unidades: miles de km³ para los reservorios, miles de km³ por año para los flujos.

de la Tierra, propiciados por las particulares propiedades de las moléculas de H₂O. Es un ciclo alimentado sobre todo por la energía solar, que impulsa la evaporación y —mediante diferencias térmicas— los movimientos del agua atmosférica, pero también es clave la fuerza de la gravedad.

Podemos ver que la renovación del agua dulce de la Tierra se produce sobre todo por la evaporación oceánica, seguida por el transporte mediante los vientos del agua atmosférica sobre tierra y la precipitación —por condensación— en ella. Cada año, unos 40 000 km³ de agua de procedencia oceánica caen sobre los continentes, alimentando las aguas superficiales o penetrando en el suelo —*percolación*—.

Parte del agua asciende desde el suelo, a través de las raíces de las plantas, y acaba en la atmósfera (un árbol medio transpira unos 200 litros de agua al día). Junto a la evaporada del suelo, acabará precipitando sobre tierra sumándose al agua de origen oceánico. El resto de esta última puede ser almacenado en los organismos y el suelo por un tiempo (de días a varios miles de años). Finalmente se drenan de nuevo a los océanos unos 40 000 km³ al año. Este volumen circulante es el que se puede considerar como *agua dulce renovable*.

Toda la vida del planeta depende de este ciclo hidrológico, que produce agua dulce a partir de la salada de los océanos. El ciclo es trascendental para la biología pero también para la geología; el movimiento del agua sobre diferentes terrenos es importante en la conformación del relieve y en la formación y enriquecimiento de suelos.

Por supuesto, el ciclo del agua conlleva un ciclo energético que está íntimamente relacionado con el clima. El calor específico del agua y su calor de vaporización son esenciales en el modo mediante el cual los océanos almacenan y liberan calor, y amortiguan los cambios de temperatura. Los vientos y las corrientes de agua distribuyen el calor mediante flujos complejos en los que es clave la mayor irradiación solar en las regiones tropicales y la menor densidad del agua —tanto líquida como vapor— a temperaturas más altas. La densidad del agua líquida crece, además, al aumentar su salinidad.

Las diferencias de temperatura y de salinidad/densidad del agua alimentan un movimiento oceánico a gran escala conocido como *circulación termohalina* (del griego *thermos*, calor, y *halos*, sal) o «cinta transportadora» oceánica, que supone un flujo neto de calor desde las regiones tropicales hacia las polares y tiene una enorme influencia sobre el clima terrestre.

El ciclo hidrológico frente al cambio climático

Es necesario saber cómo afecta el cambio climático en el que estamos inmersos (sobre todo, el calentamiento global) al ciclo del

agua, pues puede alterar la capacidad de satisfacer la demanda de esta, el nivel del mar, la frecuencia de tormentas e inundaciones y el rigor de las sequías. Aunque el problema es complejo, y las respuestas, inciertas.

El calentamiento global aumenta la evapotranspiración en tierra, pero también la evaporación oceánica, poniendo más agua en juego en la atmósfera, de modo que habrá un aumento en la precipitación sobre tierra y un mayor flujo de vuelta al océano. Es decir, se acelerará el ciclo hidrológico y se espera que aumenten los recursos de agua dulce disponibles, por lo que disminuiría el número de personas que viven bajo estrés hídrico.

En efecto, en términos globales, desde los años setenta del siglo pasado la concentración de vapor de agua en la atmósfera baja ha aumentado en un 3-4%, y también han aumentado las precipitaciones. Pero, desgraciadamente, se está comprobando lo que predijo el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático: que están creciendo las precipitaciones en los trópicos y en el Círculo Ártico con tormentas más fuertes y destructivas, e inundaciones, mientras que cientos de millones de personas viven en regiones semiáridas que se están secando aún más. Además, es de temer que se alternen inundaciones y sequías.

Jay Famiglietti (n. 1960), director del Instituto de Geofísica y Física Planetaria de la Universidad de California en Irvine (Estados Unidos), ha dirigido un estudio en el que se verifica un aumento anual del 1,5%, nada menos, en la cantidad de agua que llega a los océanos desde los ríos y las capas de hielo polares que se están fundiendo. Famiglietti declaró que «en general, más agua es bueno... Pero el problema es este: no todo el mundo está recibiendo más lluvia, y aquellos que la reciben podrían no necesitarla». La situación puede agravarse extraordinariamente si llega a frenarse, como algunos modelos predicen, el flujo termohalino.

EL AGUA COMO RECURSO HUMANO

Puede afirmarse que el agua se ha convertido en el recurso vital máspreciado para la humanidad. El 28 de julio de 2010 la Asam-

blea General de Naciones Unidas declaró «el derecho al agua potable segura y al saneamiento, algo esencial para el goce pleno de la vida y la realización de todos los derechos humanos». De ahí el gran temor a que en los próximos años se agrave el problema de la escasez de agua potable, mientras se incrementa la salinización y la contaminación de los cursos y las masas de agua y la degradación de los ecosistemas relacionados con su ciclo. Muchos de los grandes ríos, lagos y mares interiores, así como grandes acuíferos subterráneos, se han reducido drásticamente, y se han perdido muchos humedales. El acceso al agua de suficiente calidad es, y previsiblemente seguirá siendo al menos a medio plazo, un enorme problema para buena parte de la humanidad, y por solidaridad, para toda ella.

Sin embargo, aunque se hable tan a menudo de «escasez de agua» y de «estrés hídrico», no hay un acuerdo general sobre qué son y cómo medirlos, sin duda debido a que los problemas involucrados son complejos y propician diversos enfoques.

En lo que hay más consenso es en ponderar la cantidad de agua mínima para satisfacer las necesidades humanas básicas. Suele aceptarse la propuesta de Peter H. Gleick (n. 1956), del Instituto del Pacífico para Estudios sobre Desarrollo, Medio Ambiente y Seguridad (California, Estados Unidos), según la cual se necesitan unos 5 litros diarios para consumo personal, 20 para saneamiento, 15 para el aseo y 10 para la preparación de alimentos. En total, 50 litros por persona y día (unos 18 m³, o 18000 litros, al año). La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda esa misma cantidad.

Pero en este cómputo no se incluyen en absoluto las necesidades de agua para la industria, la agricultura, el transporte, la electricidad y los servicios. Se calcula que se necesitan nada menos que entre 2000 y 5000 litros de agua —dependiendo de la dieta y el entorno— para producir los alimentos consumidos por una persona cada día. ¿Cómo es posible?

El geógrafo británico de la Universidad de Londres John Anthony Allan fue el primero en darse cuenta de estos consumos

Olvidamos que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo.

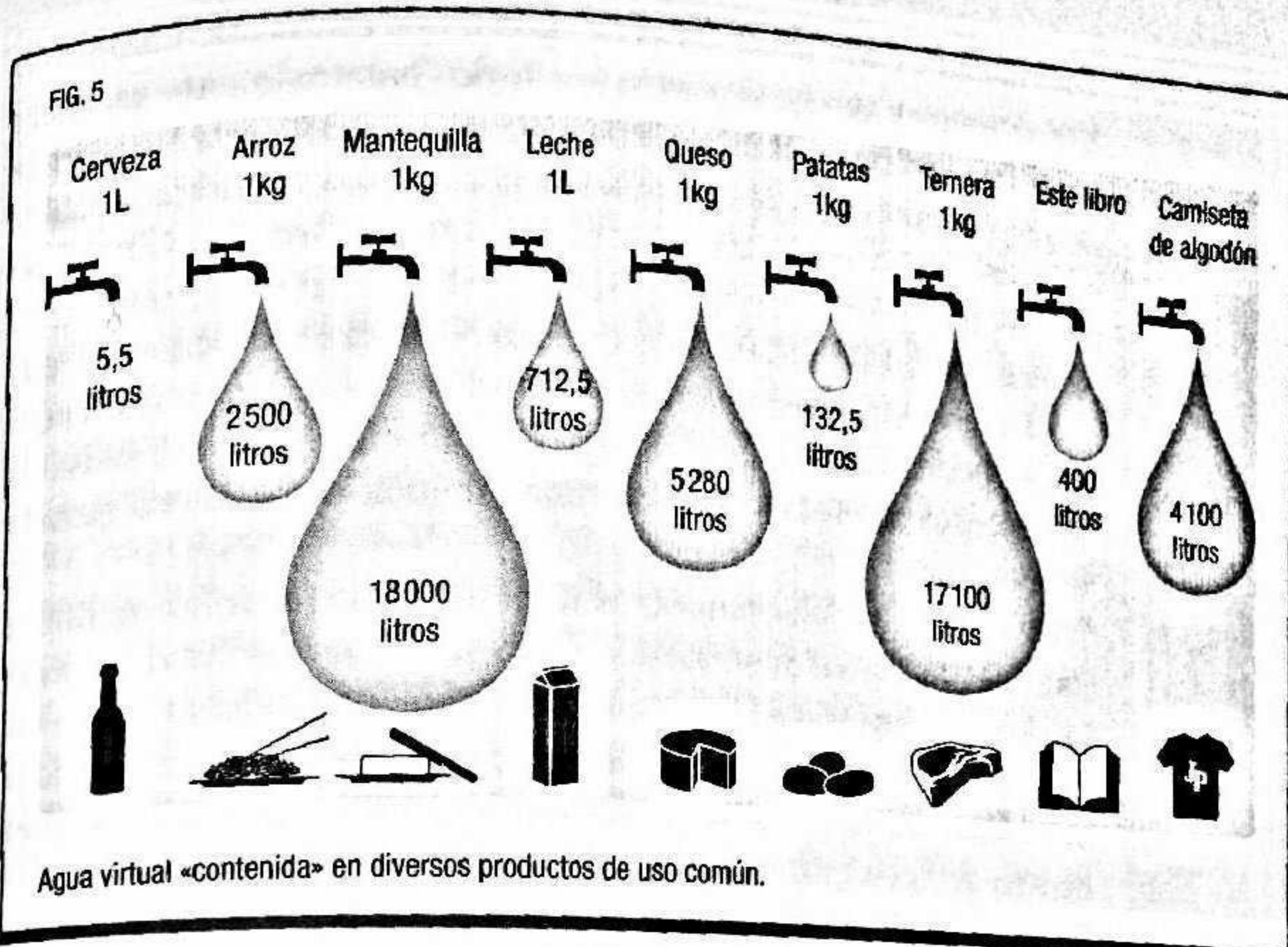
JACQUES YVES COUSTEAU

«invisibles» y en introducir en 1993 un concepto revolucionario, el del *agua virtual*, junto al modo de calcularla. El agua virtual es el volumen total de agua dulce que se necesita para producir bienes y servicios. Se dice que es virtual porque no está presente en los productos finales. En este sentido, una manzana «contiene» unos 70 litros de agua virtual, un café 140, y una hamburguesa con 150 gramos de ternera, unos 2400 (figura 5). Detrás de esas cantidades, en apariencia exageradas, estaría todo el proceso de producción y comercialización. Allan ha calculado que en un país desarrollado cada habitante consume unos 7 000 litros de «agua virtual» al día.

Otro término relacionado es el de *huella hídrica*, creado en 2002 por Arjen Hoekstra, experto del Instituto UNESCO-IHE. La huella hídrica de un país o de una industria es el volumen total de agua que se utiliza en la obtención de los productos y servicios consumidos por los habitantes del país, o por la industria.

Aunque más del 85% de las tierras cultivadas solo reciben agua de lluvia, que podemos decir que es «gratuita», se calcula que la agricultura se lleva en torno al 70% de todas las extracciones de agua dulce (de acuíferos, ríos y lagos) a nivel mundial, y ese porcentaje sobrepasa el 90% en la mayoría de los países menos desarrollados. El uso ineficiente del agua para el riego disminuye el caudal de los ríos, agota los acuíferos, degrada los hábitats naturales y ya ha provocado la salinización del 20% de la superficie mundial de tierras de regadío. Además, la deforestación de bosques para uso agrícola y un excesivo pastoreo de ganado dejan una tierra con menor capacidad de retener el agua de lluvia, lo que favorece la desertificación y el riesgo de inundaciones. El gran consumo de agua que conlleva la ganadería la hace insostenible a escala mundial.

En los países en vías de desarrollo, la demanda industrial de agua oscila entre 20 y 40 m³ por persona y año —similar al consumo doméstico—, mientras que en otros como Estados Unidos esta demanda es unas 100 veces mayor. Pero hay que tener en cuenta que gran parte de esa agua no se «gasta» en sentido literal. Antes de ir a parar al mar, un mismo volumen de agua puede utilizarse



con fines industriales, agrícolas y de otro tipo, como la navegación y la obtención de energía hidroeléctrica. Sin embargo, a menudo el agua regresa a los ríos con una carga de contaminantes. En este caso, hay que considerar el volumen de agua adicional necesario para diluirlos hasta un nivel aceptable. En realidad, esto debe aplicarse al agua destinada a cualquier uso, incluido el doméstico.

Por supuesto, la contaminación del agua es especialmente grave cuando se destina al consumo doméstico, por lo que se persigue que todas las personas tengan acceso a fuentes no contaminadas. En los países en vías de desarrollo es especialmente habitual la contaminación fecal, y se llaman *fuentes mejoradas* a las que están libres de ella de cara a los usos domésticos.

El índice de estrés hídrico

En 1989, antes de que se hablara del agua virtual y la huella hídrica, la hidróloga sueca Malin Falkenmark propuso el *índice de estrés*

hídrico, que mide la cantidad de agua dulce renovable disponible por persona y año en un cierto territorio (habitualmente un país).

Como vemos en la tabla de abajo, se considera que un territorio se encuentra en *estrés hídrico* cuando los recursos anuales disponibles de agua dulce por persona son inferiores a 1 700 m³ (1,7 millones de litros, 46 575 litros diarios). Si la disponibilidad es inferior a 1 000 m³ se dice que hay «escasez» de agua, lo que supone una limitación para el desarrollo económico y la salud y el bienestar humanos. Y si el índice es inferior a 500 m³, se habla de «escasez absoluta» de agua, una limitación sustancial para la vida humana.

El índice de Falkenmark es fácil de usar, pues no es difícil recoger los datos necesarios, pero tiene serios inconvenientes. La disponibilidad de agua por persona se calcula como un promedio tanto espacial como temporal, y por lo tanto ignora la escasez de agua en temporadas secas o en ciertas regiones dentro de un territorio. Esto ocurre sobre todo cuando se median los datos de áreas tan grandes como Australia, China, etc. Además, el índice no tiene en cuenta ni la calidad del agua ni la capacidad de un país para utilizar los recursos. Incluso si una nación está en situación de «sin estrés» de acuerdo con el índice, es posible que el agua no pueda ser utilizada a causa de la contaminación o del acceso insuficiente a ella. De modo que, aunque resulta útil, simplifica demasiado la situación del agua en algunos países.

Índice (m ³ por persona)	Condición
>1 700	Sin estrés
1 000-1 700	Estrés
500-1 000	Escasez
< 500	Escasez absoluta

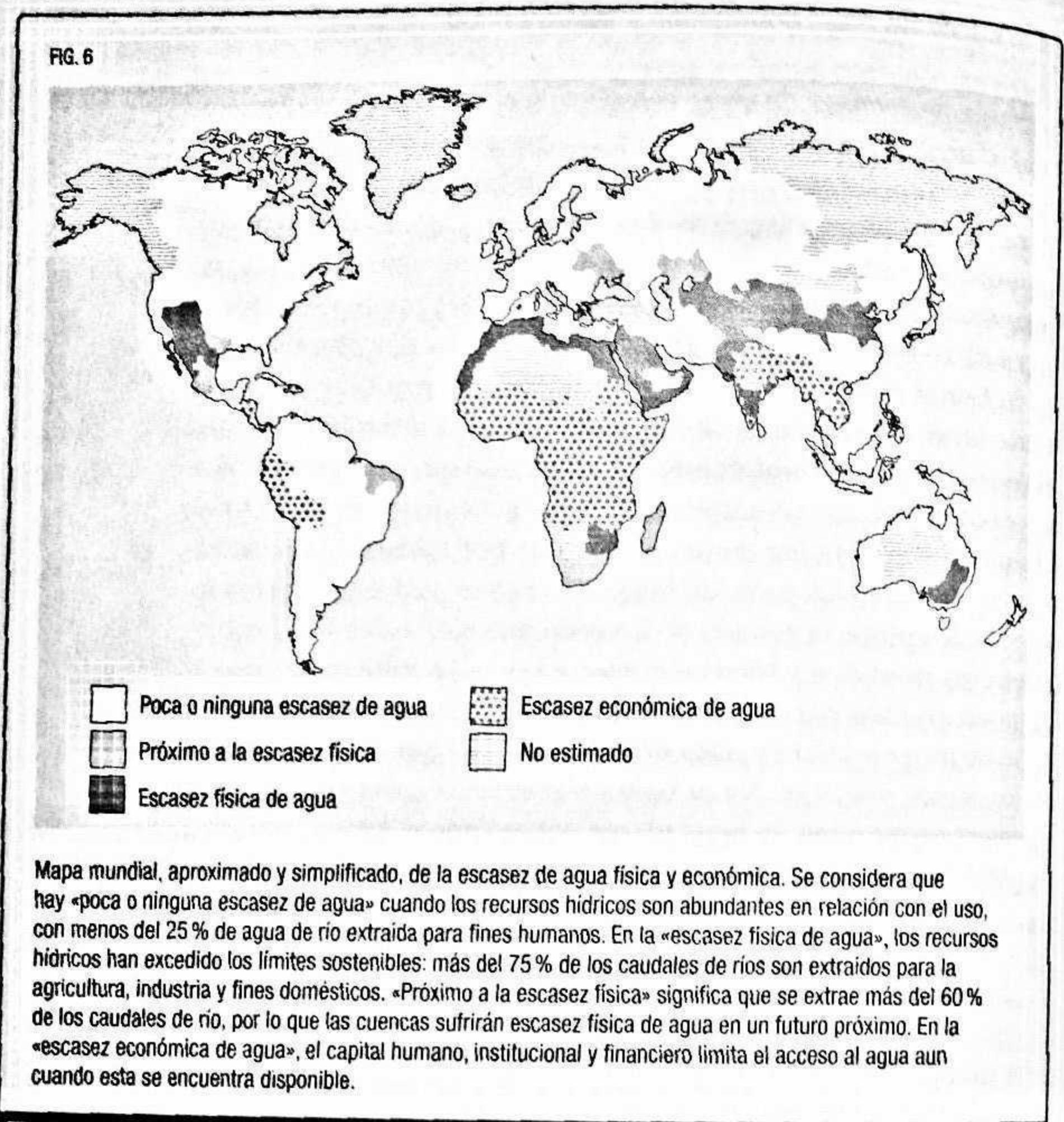
El índice de estrés hídrico de Falkenmark califica la condición en la que está un territorio respecto al agua según los metros cúbicos de esta de que dispone, de media, cada persona al año.

La escasez de agua económica e institucional

Se habla de *escasez de agua económica* cuando la poca disponibilidad se debe no a una «escasez de agua física» sino a una falta de infraestructuras para almacenarla y distribuirla por limitaciones financieras o técnicas. Por ejemplo, hay zonas en las que las precipitaciones se concentran durante una época de lluvias, pero estas son escasas en temporadas secas prolongadas. Si no hay suficiente infraestructura para almacenar y distribuir el agua de la temporada de lluvias, puede haber una gran carencia durante largos períodos. Incluso se puede especificar una *escasez de agua institucional* cuando la causa de que no se provea a los ciudadanos de un suministro de agua seguro y equitativo es la mala gestión de los recursos hídricos por parte de las instituciones, o la insuficiencia de las regulaciones jurídicas. Y es que, inevitablemente, la gestión de los recursos hídricos es un problema tanto científico y técnico como político. La falta de acceso al agua en muchos países africanos, por ejemplo, es menos el resultado de una escasez de agua de primer orden que de una escasez de recursos sociales. En la figura 6 podemos comprobar que la escasez económica de agua afecta sobre todo a África, América central, el oeste de Sudamérica y al Sudeste Asiático.

Índice de explotación del agua

Los recursos hídricos renovables, que son las aguas dulces recicladas en el ciclo global del agua, son la fuente principal disponible para el ser humano (unos 40 km³ anuales). Pero solo una fracción de estos caudales naturales es aprovechable, porque una parte importante de ellos se debe reservar para las necesidades medioambientales. Si se extrae agua de las fuentes a una velocidad superior a la que se recupera, se produce un estrés hídrico ambiental, distinto al antes considerado. El *índice de explotación del agua* (IEA, o WEI, por sus siglas en inglés) es un índice de estrés hídrico que se define como el porcentaje de la retirada anual total de agua dulce con respecto a los recursos de



agua dulce renovables anuales, y muestra hasta qué punto la demanda total ejerce presión sobre los recursos hídricos. Cuanto mayor sea, más probable es que ocurra el estrés en sistemas naturales y humanos, y que sea más difícil satisfacer unas eventuales mayores demandas en el futuro. También hay inconvenientes en el uso de este índice, como que no tiene en cuenta las variaciones estacionales, o la incertidumbre en la evaluación de las demandas y los recursos hídricos.

El IEA ha sido empleado, a veces con otros nombres, por varias instancias internacionales, como el Instituto de Recursos Mundiales (WRI, por sus siglas en inglés), una organización no gubernamental que persigue «un planeta equitativo y próspero impulsado por la sabia gestión de los recursos naturales». El WRI dice que hay estrés hídrico cuando la relación retiradas/aporte de agua es superior al 20%, y estrés severo si está por encima del 40%. En áreas de estrés extremadamente alto se alcanza el 80% o más. Este estrés hídrico provoca un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad (acuíferos sobreexplotados, ríos secos, etc.) y de calidad (el excesivo enriquecimiento en nutrientes conocido como eutrofización, la intrusión salina, etcétera).

A nivel mundial, la captación total de agua es de unos 3800 km³/año, lo que representa aproximadamente el 9% de los recursos hídricos renovables. Aunque este IEA global está muy por debajo del umbral de estrés hídrico, la cifra va en aumento, y además enmascara grandes diferencias entre regiones. Los valores de IEA por países muestran que la escasez de agua se concentra en gran medida en el mundo menos desarrollado. Muchos países asiáticos y africanos se enfrentan a una escasez severa, tres veces mayor que la europea. Pero en Europa, Chipre tiene un IEA del 64% y Bélgica y España de más del 30%.

En realidad, el *riesgo hídrico* es algo más complejo. El WRI ha desarrollado la iniciativa denominada Aqueduct (Acueducto), con la que proporciona mapas mundiales interactivos que ofrecen una docena de indicadores sobre el agua relativos a su cantidad, variabilidad, calidad, acceso, conciencia pública sobre los problemas, y vulnerabilidad de los ecosistemas. Finalmente calcula una puntuación global para cada zona, y realiza un excelente mapa mundial de riesgo hídrico en el que se aprecia que, a grandes rasgos, las zonas de mayor riesgo general son las

Debemos conectar los puntos entre el cambio climático, la escasez de agua, la escasez de energía, la salud mundial, la seguridad alimentaria y el empoderamiento de las mujeres. Las soluciones a un problema deben ser soluciones para todos.

BAN KI-MOON

sometidas a mayor estrés por la extracción de agua. La situación es especialmente grave para los 37 países con niveles «extremadamente altos» de estrés hídrico, en los que se retira anualmente más del 80% del agua disponible para los usuarios agrícolas, domésticos e industriales. Grave, pero no irremediable, pues en los últimos años se ha demostrado que una buena respuesta política puede dar frutos muy positivos.

Los logros de los «Objetivos de Desarrollo del Milenio» en 2015

En 1990, Naciones Unidas señaló el acceso al agua y al saneamiento como una de sus grandes metas (la 7.7) a alcanzar dentro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) para 2015, y en general fue un éxito, pues hubo avances importantes. En esos veinticinco años, más de 2 600 millones de personas consiguieron acceso a «fuentes mejoradas» de agua potable, con lo que el porcentaje de personas con ese acceso subió del 76 al 91%.

Pero los datos anteriores también significan que cerca de 700 millones de personas (casi la mitad de ellas en el África subsahariana) todavía no accedían a esas fuentes. Más aún: lamentablemente, el agua que proviene de una «fuente mejorada» puede no estar libre de otros tipos de contaminación —incluida la bacteriana—, de modo que el número de personas sin un buen acceso fiable a un agua de calidad, segura para el consumo humano, ascendía, al menos, a 1 800 millones. Peor todavía: unos 3 000 millones sufrían escasez de agua, y unos 2 400 millones carecían de acceso a servicios básicos de saneamiento.

Aún hay 16 países en los que más del 40% de la población se ve en la necesidad de recolectar agua sucia de fuentes que representan un riesgo para la salud, en muchos casos mortal. Después de la neumonía, las enfermedades diarreicas causadas por la ingesta de agua sucia y la falta de saneamiento adecuado constituyen la principal causa de mortalidad infantil —unas 315 000 muertes al año, cerca de 900 al día—. Casi el 80% de las enfermedades y la tercera parte de las muertes en los países

en vías de desarrollo se deben al agua contaminada. Entre esas enfermedades destacan la disentería, el cólera, las fiebres tifoides, la dracunculiasis y la hepatitis. Además, en muchas aguas anidan mosquitos transmisores del dengue y otras enfermedades. Y es que más del 80% de las aguas residuales resultantes de las actividades humanas se vierte en ríos o el mar sin que se eliminen los contaminantes.

Es decir, que a pesar de los avances queda mucho que mejorar, pues demasiadas personas han quedado al margen. Y lo peor es que se prevé que algunas de esas malas cifras aumenten. Los recursos hídricos se hacen más frágiles conforme la población aumenta, con cambios indeseables en el uso de la tierra y la extensión de la deforestación. Las amenazas se verán agudizadas por los efectos del cambio climático y, como es habitual, tendrán mayor impacto en los más pobres.

En resumen, aunque, empleando números globales, se podría decir que la Tierra tiene reservas de agua dulce que exceden las necesidades de toda la población humana, gran parte de esta no tiene un buen acceso al agua para la agricultura, la ganadería, la industria y el consumo doméstico. ¿Dónde está el problema? En la deficiente gestión y distribución del agua. Con buena gestión y suficiente inversión, toda la población podría ver sus necesidades de agua satisfechas. Parte de las dificultades provienen de la naturaleza transfronteriza del agua. A los problemas físicos y económicos se añaden los políticos, de modo que en la actualidad hay varios puntos del planeta en los que el acceso al agua es un germe importante de conflictos entre países. Incluso dentro de los propios Estados, los enfrentamientos de intereses entre distintas zonas —por ejemplo, a propósito de trasvases— pueden ser graves, provocando tensiones territoriales y crisis regionales de difícil resolución.

La diarrea, el 90 % de la cual es causada por alimentos y agua contaminada por excrementos, mata a un niño cada quince segundos. Eso es más que el SIDA, la malaria o el sarampión, combinados. Las heces humanas son una impresionante arma de destrucción masiva.

ROSE GEORGE, PERIODISTA BRITÁNICA

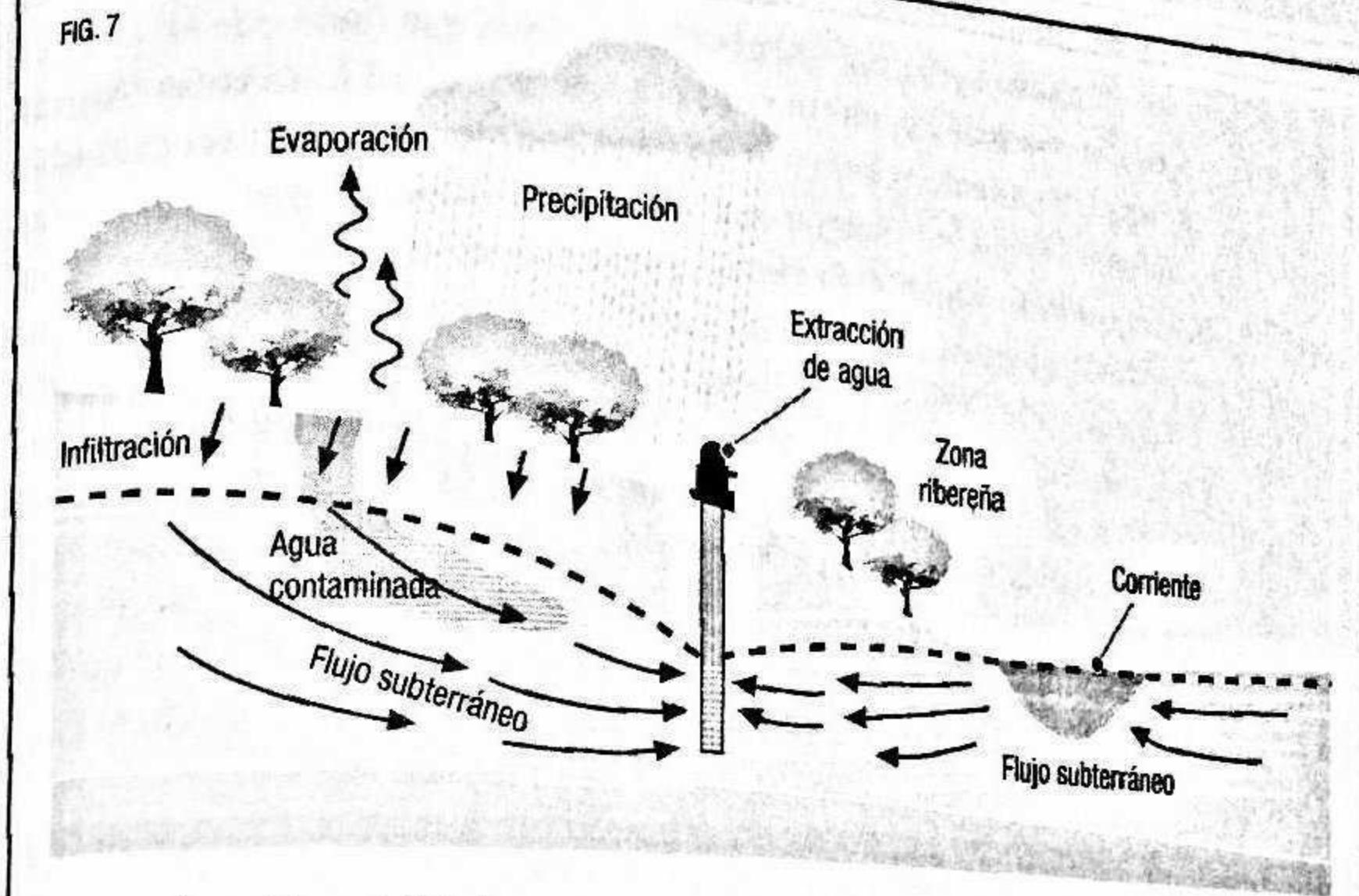
De las soluciones a nuevos problemas

¿De dónde sacar más agua para satisfacer todas las necesidades? Una fuente cada vez más empleada son las aguas subterráneas. Si se extraen de forma sostenible, es decir, si se permite su recarga durante los períodos de abundante agua de superficie, constituyen una excelente forma de almacenamiento que puede amortiguar las épocas de sequía. Pero esto no se aplica a las aguas subterráneas fósiles, un recurso que puede tener varios miles de años de antigüedad, puesto que no se reponen con las lluvias estacionales. Cada vez que la extracción intensiva de aguas subterráneas supera las tasas de recarga, se ocasiona una disminución en este recurso; 21 de los 37 acuíferos más grandes del mundo están gravemente sobreexplotados, con un riesgo cada vez mayor para la producción alimentaria.

Además, la excesiva explotación de acuíferos propicia que se contaminen desde la superficie. El agua que se infiltra lleva los contaminantes que haya sobre el suelo hasta la capa de agua subterránea (figura 7). La contaminación procede a menudo del uso indiscriminado de productos agrícolas tales como fertilizantes químicos, productos fitosanitarios, etc. A veces se tarda demasiado en percibir sus efectos, cuando ya se han introducido grandes cantidades de contaminantes. La sobreexplotación de acuíferos también produce en ocasiones la *subsidiencia* o hundimiento del terreno.

En muchos lugares costeros del mundo, con explotaciones agrícolas y escasez de agua superficial, se produce la *salinización de sus acuíferos*. Cuando se extrae de ellos agua subterránea en exceso, se ocasiona la entrada de agua marina salada. Entonces, el agua de riego saliniza los campos agrícolas haciendo que pierdan su fertilidad y su productividad. La salinización constituye un grave problema que puede comprometer el futuro de buena parte de la humanidad.

Otra solución parcial supone mejorar en alguna medida la redistribución de las aguas mediante trasvases, pero a menudo conlleva importantes impactos ambientales, sociales y económicos. La alternativa a los trasvases puede ser en muchas ocasio-



Esquema de un sistema de flujo de aguas subterráneas en un entorno agrícola. Un acuífero, del que se extrae agua mediante bombeo, recibe agua de la zona de la derecha. La infiltración del agua precipitada o de riego (zona izquierda) puede transportar productos contaminantes al acuífero.

nes la construcción de *desalinizadoras* —o desaladoras— del agua del mar, pero tampoco es una medida exenta de complicaciones, puesto que pueden producirse impactos ambientales, sobre todo porque se acumulan residuos en forma de agua con una alta concentración de sal, y además se necesita una gran cantidad de energía, con el coste correspondiente. Hoy se hace imprescindible analizar siempre el *binomio agua-energía*, considerando el agua (su captación, transporte, tratamiento y distribución) como consumidora de energía. No obstante, la desalación ya está siendo una solución excelente en algunos territorios y hay puestas muchas esperanzas en incentivar la construcción de plantas desalinizadoras menos contaminantes y que utilicen fuentes de energía renovables (fotografía superior de la pág. 79).

Asimismo —y para muchos es lo más importante— es preciso mejorar a escala global la depuración de las aguas, que permita optimizar la reutilización de las contaminadas por los distintos

usos. Incluso donde el agua es abundante, puede ser un grave problema su «amigabilidad» para la vida, que hace que en ocasiones se constituya en un caldo de cultivo ideal para todo tipo de microorganismos, muchos de ellos patógenos. Las enfermedades transmitidas por el agua ocasionan 3,5 millones de muertes anuales, principalmente en el mundo en vías de desarrollo, donde hay grandes carencias de un saneamiento y una purificación del agua adecuados. Hay mucha confianza en que las nuevas capacidades biotecnológicas ofrezcan soluciones eficaces y baratas, que las hagan accesibles a las poblaciones con menos recursos (fotografía inferior de la página contigua).

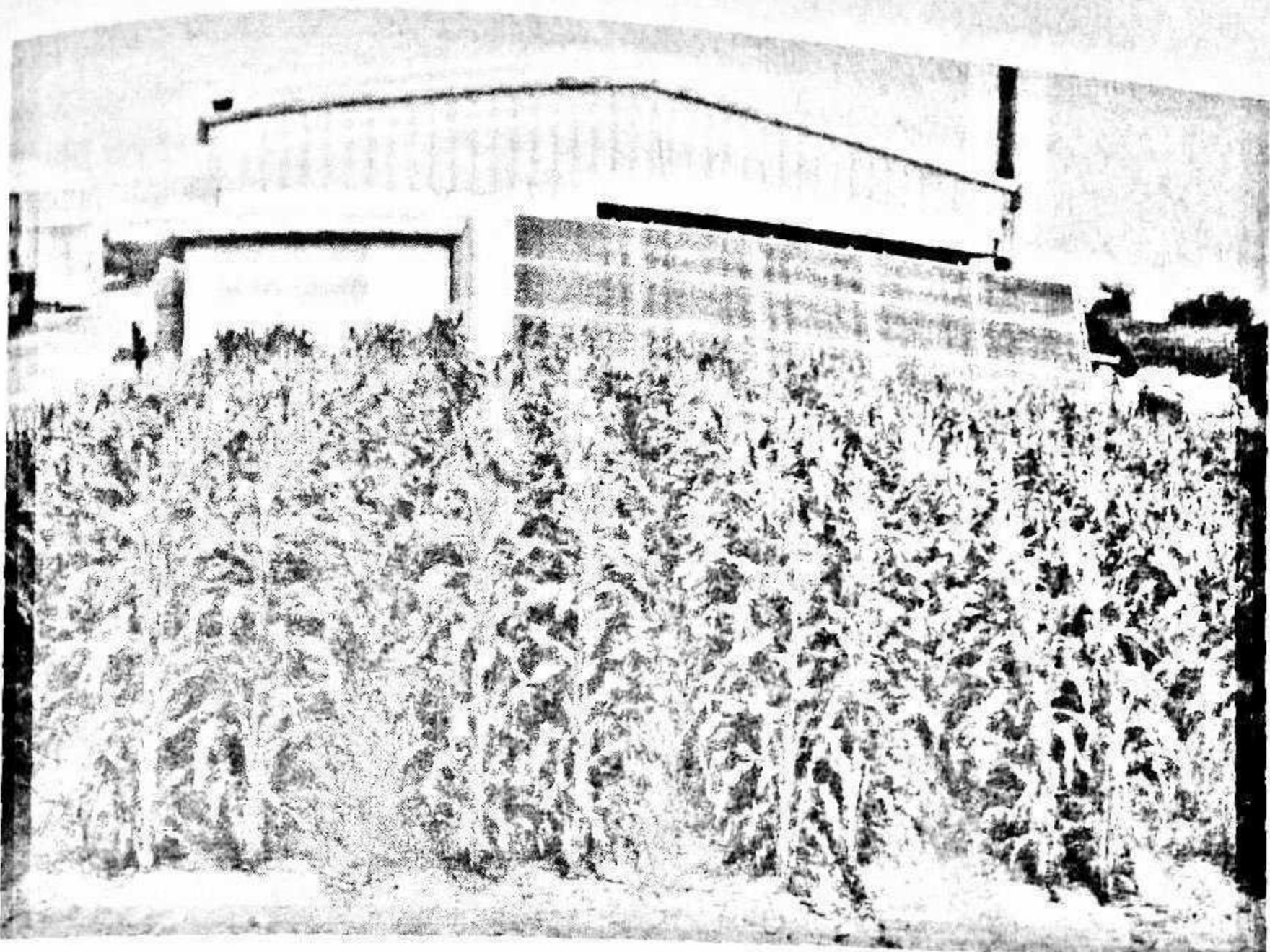
Malas perspectivas a medio plazo

A pesar de los avances en la capacidad de elaboración de modelos, es muy difícil predecir la situación futura de la humanidad respecto al agua debido a las incertidumbres climáticas, económicas y sociopolíticas.

Sin embargo, el análisis del impacto probable de los cambios climáticos y socioeconómicos sobre la disponibilidad de agua puede ayudar a organizaciones internacionales y Estados (junto a empresas e instituciones financieras) a tomar medidas para mitigar riesgos y adaptarse mejor a los escenarios más plausibles. El WRI ha estudiado el estrés hídrico futuro en 167 países, y prevé que 33 de ellos encararán un estrés severo en 2040 (figura 8) si no se toman medidas para evitarlo.

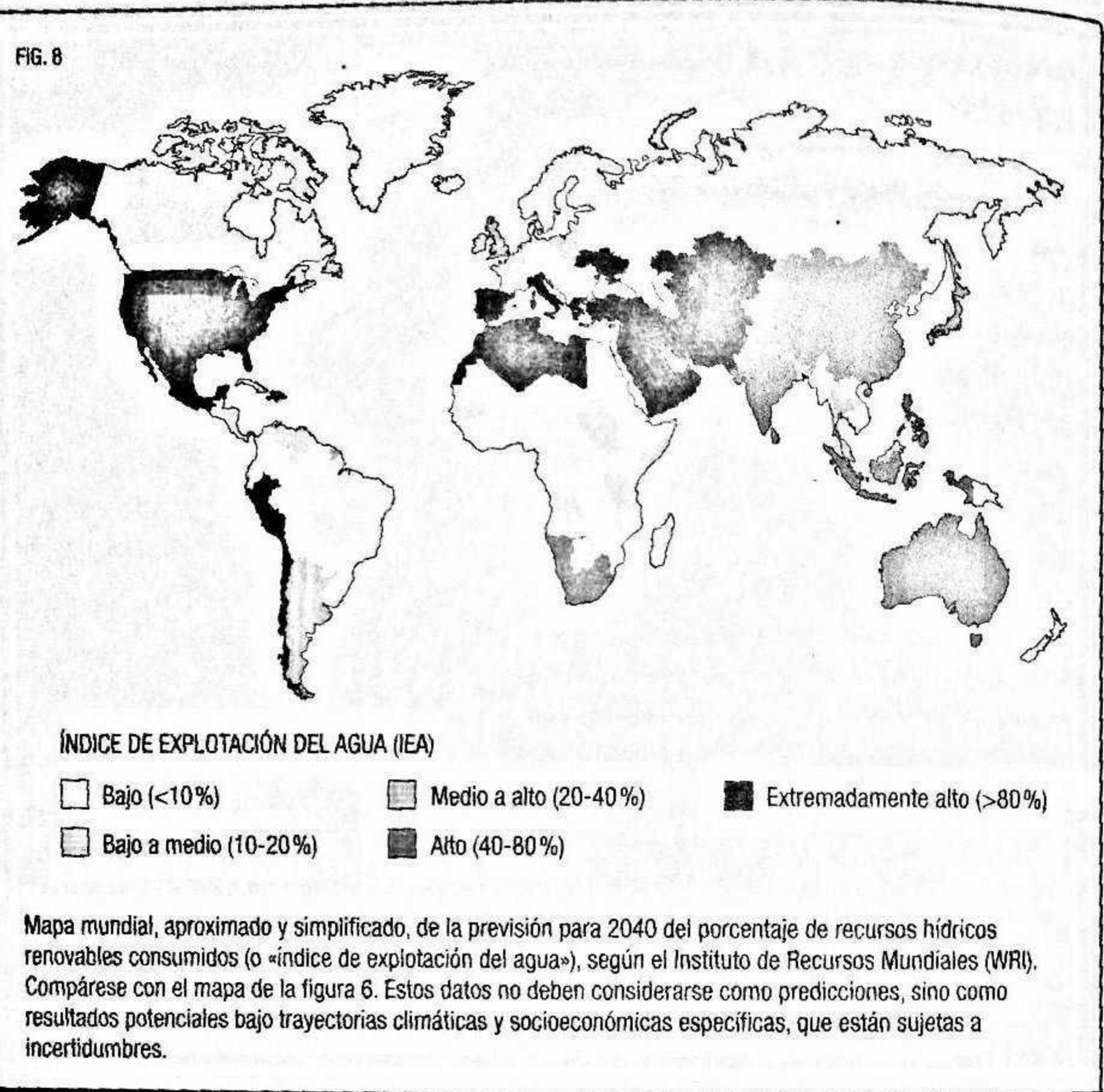
Por otro lado, el «Escenario de referencia de perspectivas ambientales mundiales» de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), publicado en 2012, prevé un aumento de las tensiones en la disponibilidad de agua dulce hacia el año 2050; concretamente, se pronostica que unos 2 300 millones de personas más —hasta llegar a más del 40% de la población mundial— vivan en zonas con estrés hídrico severo, sobre todo en el norte y sur de África y en el sur y centro de Asia.

En 2050 la demanda global de agua dulce habría aumentado un 55% debido al incremento en la demanda de la industria



Arriba, cultivos regados con agua desalada con energía solar, solución que minimiza el problema del elevado coste energético que requiere la desalación del agua marina. La fotografía inferior ilustra un filtro revolucionario y de bajo coste para purificar agua directamente en la botella, un recurso esencial en regiones deprimidas para evitar las enfermedades transmitidas por los agentes patógenos presentes en el agua contaminada.

FIG. 8



manufacturera (400%), la generación de electricidad térmica (140%) y el uso doméstico (130%). La clave para contener esa mayor demanda global puede estar en la agricultura, y de hecho la OCDE vaticina un descenso del 11% en el consumo de agua para riego agrícola.

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) calcula que para 2050 el aumento de la población (hasta los 9 100 millones de personas) obligará a un incremento de más del 60% en la producción agrícola (y un 100% en los países menos desarrollados). Pero confía, como la OCDE, en

que este incremento proceda sobre todo de una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua y un mayor rendimiento e intensidad de los cultivos. Aunque la contaminación del agua puede empeorar con el aumento de la agricultura intensiva, y aumentar los problemas para el abastecimiento de agua, de modo que se requiere disminuir los impactos ambientales de las actividades agrícolas. En pocas palabras, el lema para el futuro es «producir más alimentos con menos agua... y menos impacto ambiental».

Para lograr un uso más productivo del agua en la agricultura se necesitan innovaciones tecnológicas —incluida la generación de organismos mediante biología sintética— junto a un mejor control del agua, una mejor ordenación de tierras y mejores prácticas agrícolas.

Con todo, según la FAO, en 2050 la agricultura continuará siendo el mayor usuario de los recursos hídricos retirados para uso humano, que representarán más de la mitad (a veces el 70% o más) de las extracciones de ríos, lagos y acuíferos.

Para colmo, el cambio climático

Por lo que ya vimos a propósito del ciclo del agua, se teme que el cambio climático agrave los peores augurios sobre su disponibilidad, sobre todo por el aumento en la frecuencia, intensidad y dureza de fenómenos meteorológicos extremos. Además, algunos científicos prevén que el cambio climático deteriore en términos globales la calidad del agua.

La quinta evaluación realizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) previó en 2014 que, por cada grado de aumento de la temperatura global, en torno al 7% de la población mundial quedará expuesta a una disminución de los recursos hídricos renovables de al menos el 20%, lo que en pocas décadas dejaría a la mayor parte de la población mundial en riesgo de escasez de agua. Entre las regiones más vulnerables se incluyen los países del Mediterráneo, zonas de América del Sur, Australia Occidental, China y el África subsahariana. Los riesgos de inundación aumentarían sobre todo en

zonas del sur, sureste y noreste de Asia, en el África tropical y en América del Sur. Además, según algunos investigadores aumentará el riesgo de tsunamis y maremotos.

El sector económico más vulnerable es, sin duda, la agricultura, que sigue siendo el motor del desarrollo económico en muchas economías emergentes. El cambio climático alterará, según las previsiones, los regímenes de temperaturas, las precipitaciones y los caudales de los ríos de los que dependen los sistemas agrícolas. Mientras que algunos sistemas agrícolas de latitudes más elevadas posiblemente se vean beneficiados por la subida térmica al poder dedicar más tierras al cultivo, las latitudes inferiores soportarán la mayor parte de los efectos negativos.

El recalentamiento mundial aumentará previsiblemente la frecuencia y la intensidad de las sequías e inundaciones en las zonas subtropicales. La subida del nivel del mar perjudicará a los deltas y las zonas costeras. También se prevé que los sistemas montañosos y las tierras altas y de regadío que dependen del deshielo veraniego experimenten, a largo plazo, grandes variaciones de caudales. ¿Qué hacer ante las malas perspectivas?

La esperanza, para 2030

Tras el buen cumplimiento general de los ODM, Naciones Unidas puso en marcha en 2016 la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que insta a lograr 17 «Objetivos de Desarrollo Sostenible» (ODS) a alcanzar en esa fecha. Todos los objetivos tienen relación con el agua, aunque merece destacarse el número 1, «Erradicar la pobreza extrema», y el 2, «Erradicar el hambre»; no hay más que notar cómo la sequía afecta a algunos de los países más pobres del mundo agravando el hambre y la desnutrición. Pero el agua es por sí misma la protagonista principal del Objetivo 6: «Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos».

En pocas palabras, lo que se pretende es conseguir en 2030 el acceso universal y equitativo al agua potable, a un precio asequible para todos, así como que todas las personas tengan acce-

so a servicios de saneamiento e higiene adecuados. Se deberá mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, minimizando la descarga de materiales y productos químicos peligrosos. Se persigue reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar sustancialmente el reciclado y la reutilización. Es necesario aumentar considerablemente la utilización eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce. Además, se deben proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

Como seguimiento del Objetivo 6, Naciones Unidas publica informes anuales sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. El de 2016 abordó un tema poco atendido antes: la relación entre el agua y el empleo, partiendo del reconocimiento de que el agua constituye la base del desarrollo económico y el bienestar social, al ser esencial para la producción de alimentos y energía, y servir «como un insumo necesario y a menudo insustituible en una amplia variedad de cadenas de valor industrial».

En un mundo cada vez más poblado y más amenazado por el cambio climático, la humanidad debe hacer el mayor esfuerzo y poner toda la inteligencia para planificar y gestionar los recursos hídricos.

El agua en el sistema solar

Aunque lo llaman el «planeta azul», la Tierra no es el cuerpo con más agua del sistema solar. Su distribución en este último es muy desigual, y además puede encontrarse en muy diversos estados. Incluso es posible que en algunos lugares pueda dar cobijo a seres vivos, similares o no a los terrestres.

Hablar del agua en el sistema solar no puede reducirse a un simple y monótono inventario de cuánta hay en cada uno de sus cuerpos (planetas, satélites, etc.), cosa que, por cierto, solo podríamos hacer de manera muy incompleta e incierta. Si nos interesa el agua para evaluar la posibilidad de que cualquiera de esos cuerpos pueda desarrollar vida, o mantenerla, o proporcionarla para un eventual asentamiento humano en el futuro, importa mucho saber en qué partes de ellos se concentra, en qué estado se encuentra (sólido, líquido, gaseoso) y con qué «calidad».

A medida que se explora el sistema solar, se está hallando agua en lugares y cantidades sorprendentes. Sabemos que, en primera aproximación y en promedio, hay más agua en los objetos del sistema solar externo (de Júpiter, o desde la línea de nieve, hacia fuera), pero es evidente que interesa asimismo mucho la que haya en los cuerpos interiores rocosos por su relación con la vida. No obstante, también despiertan expectativas biológicas los satélites de gigantes gaseosos con desconcertantes océanos subsuperficiales. Y nos importa también el agua —junto con las sustancias que la acompañan— de los asteroides y cometas, que probablemente han surtido a la Tierra y han ayudado a la formación de la vida en ella.

EL AGUA EN EL SISTEMA SOLAR INTERIOR

Se podría pensar que más acá de la línea de nieve, sin contar la Tierra, poca cosa puede esperarse en lo que al agua se refiere, pero las sorpresas empiezan ya con el achicharrado Mercurio. Este planeta ostenta dos récords en el sistema solar: es el más pequeño (un poco más grande que la Luna) y el más próximo al Sol. Esta cercanía hace que durante el día se alcancen en él temperaturas que superan los 400 °C. ¿Es entonces imposible que haya agua en Mercurio? Pues la hay, y helada, como después de años de pruebas no concluyentes confirmó la sonda Messenger de la NASA, en 2012 y 2014.

El hielo negro de Mercurio

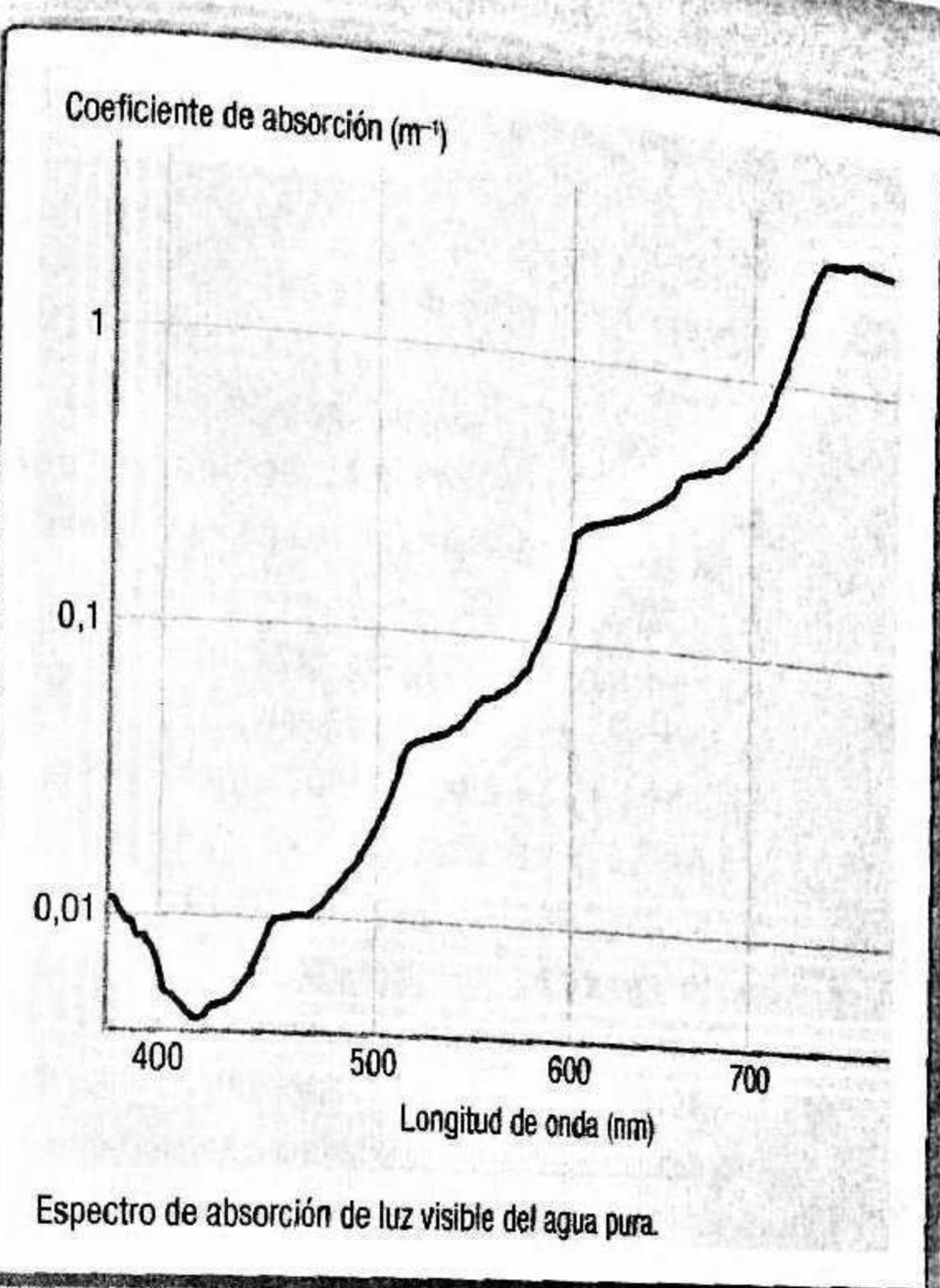
En realidad, la existencia de hielo en Mercurio es fácil de explicar, ya que durante la noche se alcanzan los -180 °C, y en las zonas poco o nada irradiadas por el Sol tan bajísima temperatura se mantiene debido a la ausencia de atmósfera (de existir esta, las diferencias de temperaturas se amortiguarían). En el polo norte se encuentran grandes depósitos de hielo, y por eso se habla de un «mundo de hielo y fuego». Sin embargo, no se observan casquetes blancos, ya que se trata de un hielo oscuro, conocido como *hielo negro*. El color es debido a la abundancia de sustancias orgánicas, que además, al constituir una capa de unos 10 a 20 cm de espesor, evitan la sublimación del hielo subyacente.

El origen del hielo parece extramercuriano; del mismo modo que los cometas y asteroides trajeron abundante agua a la Tierra, lo hicieron también con el resto de planetas, Mercurio incluido. Tras los impactos, los compuestos volátiles, y el agua en particular, serían ionizados por la radiación UV del Sol. Como Mercurio es, junto con la Tierra, el único planeta interior que posee una notable magnetosfera —generada por el núcleo externo de hierro líquido del planeta—, los iones seguirían las líneas de campo de esta hasta los polos, y ahí quedarían depositados, en

LOS COLORES DEL AGUA

Nos sorprende el color oscuro del hielo de Mercurio porque habitualmente vemos el hielo, como la nieve, de color blanco. Por otro lado, se suele decir que el agua es incolora, aunque también la observamos de diversas tonalidades. ¿A qué se deben esos colores diferentes? Empecemos por el agua líquida. Las grandes masas de esta suelen aparecer azules; ¿será por el reflejo del azul del cielo? Aunque algo contribuye, el agua tiene un color azulado por sí misma.

Se puede comprobar de la manera más objetiva obteniendo el espectro de absorción del agua. Como se ve en la figura, el agua absorbe un poco más en la región que va desde los 600 nm en adelante (hacia la derecha), que corresponde a la banda de los tonos rojizos, mientras que refleja ligeramente la luz de tonos azulados. Esta absorción diferencial se explica por las vibraciones atómicas de sus moléculas. El color es tan débil que solo se hace notable para espesores considerables, como por ejemplo el de los mares.



El color de la nieve

En la naturaleza, ese azul intrínseco se ve modificado, en primer lugar, por el contenido del agua: la presencia de algas y otros organismos, y a veces de ciertos minerales, altera el color primario, en ocasiones de manera muy notoria. El agua helada también tiene ese ligero color azul. Pero, en el caso de la nieve, la existencia de infinidad de copos hace que la luz solar blanca rebote sobre un sinfín de superficies y finalmente se disperse y llegue a los ojos del espectador. Si se trata de hielo, cuanto más compacto sea menos se produce esa dispersión, y cuanto más espesor haya, más se aprecia el azul.

las «trampas de frío» de cráteres en oscuridad permanente. Las partículas del viento solar y de los rayos cósmicos que llegarán a los polos, más desprotegidos, impulsarían las reacciones que explican la asombrosa abundancia de sustancias orgánicas.

Agua en el infierno de Venus

Por su parte, Venus es un planeta muy seco. Si se condensara toda su agua atmosférica, formaría una capa de unos escasos 3 cm. Los problemas de Venus con el agua provienen, en primer lugar, de su cercanía excesiva al Sol. Pero eso no lo explica todo, pues su temperatura superficial (464 °C de media), mayor que la de Mercurio, es muy superior a la esperada por la distancia a su estrella. La razón es un enorme *efecto invernadero*. Hoy la atmósfera venusiana inferior tiene un 96% de CO₂, un 3,5% de N₂, y, atención, una presión atmosférica 90 veces superior a la terrestre.

Todo ello se debe al ciclo de pérdida de agua que sufrió. Al recibir el doble de radiación solar que la Tierra, el agua se evaporó mucho más y causó un gran efecto invernadero que calentó adicionalmente la superficie, liberándose entonces aún más agua a la atmósfera, y potenciando dicho efecto invernadero.

Además, por razones no bien aclaradas, Venus carece de la protección frente al viento solar de un campo magnético significativo. Parece que la radiación UV rompió (*fotodisoció*) el H₂O liberando el ligero H, que se escapó fácilmente al espacio —todavía se mide una pérdida de hidrógeno en la actualidad—, mientras el oxígeno se perdía en parte y el resto iba reaccionando con compuestos de la superficie. La rotura por UV también afectó al CO₂, pero su huida al espacio sería menor.

Venus fue perdiendo más y más agua, y sus océanos se fueron desecando. Esta gran pérdida global está avalada por una alta relación D/H en la atmósfera. Al no mantenerse agua líquida en la superficie, no funcionó el mecanismo —como el que opera en la Tierra— por el que el CO₂ se elimina de la atmósfera convirtiéndose en rocas carbonatadas (calizas y otras), y se acumuló

en cambio en ella, originando un importante aumento extra del efecto invernadero.

Pero ¿y anteriormente a este ciclo infernal? Diversos autores han presentado pruebas y argumentos, basados en los datos de la sonda Venus Express (2005-2014) de la Agencia Espacial Europea (ESA), a favor de que hace unos miles de millones de años, cuando el Sol era más frío y su zona habitable estaba más cercana a este, Venus también tuvo océanos o lagos, tal vez durante varios cientos de millones de años (concretamente hasta hace unos 715 millones según algunos modelos). Esta fecha no es casual, pues es en la que parece que Venus sufrió un episodio volcánico masivo que pudo cambiar en gran medida su superficie.

Cuando había tanta agua, pudo surgir y evolucionar la vida, que después tal vez resistiría recluida en algunos nichos establecidos, acaso todavía en las nubes ácidas de temperaturas moderadas. A favor de esta hipótesis se argumenta la presencia de sulfuro de carbonilo (OCS), difícil de producir abióticamente, y de «misteriosas» manchas oscuras en las imágenes de Venus en el UV, pero lo más probable es que el OCS y las manchas tengan explicaciones no biológicas. De todas formas, seguramente Venus nos reservará aún buenas sorpresas.

La casi seca Luna

Antiguamente se creía que en la Luna abunda el agua, de ahí el nombre de «mares» que se dio a sus extensas llanuras. Sin embargo, cuando Neil Armstrong y Edwin Aldrin pisaron el Mar de la Tranquilidad en 1969, ya nadie temía que pudieran ahogarse, pues hacía tiempo que se tenía la imagen de una Luna esencialmente seca, y se sabía que los astronautas caminarían sobre firme roca basáltica.

En efecto, la Luna, a pesar de ser un cuerpo «hermano» y compañero de viaje de la Tierra, es mucho más seca que esta. El calentamiento diurno de este mundo sin atmósfera eleva las temperaturas hasta más de 100 °C. Por otro lado, la baja gravedad derivada de su relativamente poca masa dificulta la retención

de compuestos volátiles. Además, como parece que la Luna se originó hace unos 4520 millones de años a raíz del colosal impacto entre un protoplaneta del tamaño de Marte y la Tierra, se pensaba que difícilmente habría sobrevivido mucha agua en el cuerpo de magma candente que en última instancia se convirtió en nuestro satélite. Habría que contar, más bien, con la aportada después por cometas y sobre todo asteroides, la cual podría tener considerable interés práctico en la eventual exploración y colonización del satélite.

En efecto, a pesar de todo, algo de agua hay en la Luna. Se produjo cierta conmoción cuando en 1994 la sonda Clementine, y en 1998 la Lunar Prospector (ambas estadounidenses), encontraron pruebas de la existencia de hielo en algunos cráteres polares, confirmada en 2008 por la sonda india Chandrayaan-1 (véase la imagen superior de la pág. 95). A la bajísima presión atmosférica de la Luna, el hielo iluminado por el Sol se sublima, y la baja gravedad lunar facilita que el vapor de agua se pierda hacia el espacio, así que el hielo que queda se explica del mismo modo que en el caso de Mercurio: en los polos de la Luna, con el Sol siempre muy bajo en el horizonte, existen cráteres con zonas que están siempre a la sombra.

Por otro lado, después de un reanálisis del mineral apatita traído a la Tierra entre las décadas de 1960 y 1970 por las misiones espaciales Apolo, y del estudio de un meteorito lunar encontrado en el norte de África, se concluyó que la Luna podría ser por lo menos cien veces más húmeda de lo que se pensaba, pero un nuevo examen ha rebajado esas expectativas.

En suma, hoy vemos la Luna como un cuerpo muy seco. Hasta puede sorprender que tenga unas 40 veces menos agua que Mercurio, pero esto se explica por tres causas principales. La primera es que nuestro satélite puede haber perdido buena parte del hielo que llegó a tener debido a varios cambios en la inclinación de su eje de rotación, en los que sucesivamente quedarían expuestos al Sol diversos depósitos. La segunda es la menor gravedad de la Luna, que facilita el escape de volátiles. Y la tercera, que la fuerte magnetosfera mercuriana (de la que carece el satélite) protege contra la pérdida de esos compuestos.

No obstante, dado que persisten las incógnitas sobre el origen y la antigüedad del agua lunar, e incluso sobre su «calidad» a la hora de su uso en exploraciones humanas, se hacen necesarios nuevos análisis, como los que pretende llevar a cabo el proyectado vehículo Resource Prospector de la NASA, que podría lanzarse durante la década de 2020.

Marte, agua... ¿y vida?

Aunque en Marte no veamos mares, sabemos que dispone de abundante agua, solo que en forma de hielo. En las condiciones de baja presión y temperatura marcianas, apenas puede existir, y en todo caso de manera muy efímera, agua líquida en la superficie.

El hielo abunda en los polos. Los casquetes polares de Marte están constituidos por CO_2 congelado («hielo seco») y hielo de agua. Si pudiera derretirse toda el agua del casquete sur, cubriría todo el planeta con una profundidad media de 11 m. Y el hielo subterráneo que en 2016 encontró la NASA en la región de Utopia Planitia es equivalente al volumen de agua del Lago Superior (el mayor de los Grandes Lagos de Norteamérica).

Como no se ha detectado agua líquida, cualquier indicio de su existencia pasada se aprovecha para reverdecer las especulaciones acerca de la posible vida marciana. En este sentido destaca que la misión Mars Global Surveyor, de la NASA, obtuvo en 2006 pruebas fotográficas de los efectos de flujos de agua líquida muy recientes (quizá de menos de diez años). Y las imágenes obtenidas en 2015 por la sonda MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) han demostrado la afluencia de agua líquida salada durante el verano marciano, cuando la temperatura sube a unos 20°C (véase la imagen inferior de la pág. 95).

Hay pruebas de que en el pasado ha habido, al menos ocasionalmente, abundancia de agua líquida en Marte. Lo que más salta a la vista es la existencia de dos tipos de *canales*. Unos son valles anchos que parecen claros productos de grandes flujos de líquidos que circularían rápidamente por la superficie. Otros son sinuosos, aparentes vestigios de una red fluvial muy ramificada

a lo largo de cientos de kilómetros, sobre todo en el hemisferio sur. En los dos casos, el líquido solo pudo ser agua.

Los datos obtenidos por el vehículo Curiosity de la NASA desde 2012 también apoyan la existencia de agua en el Marte de hace 3500 millones de años, aunque por otro lado indican unas concentraciones de CO_2 inferiores a las necesarias para conservar el suficiente efecto invernadero que la mantuviera líquida.

Recientemente, científicos de la propia NASA, utilizando esta vez telescopios terrestres, fueron capaces de estimar la cantidad de agua que Marte ha perdido basándose en medidas de la relación D/H, con la premisa de que la pérdida preferente al espacio de H respecto a D provoca que el

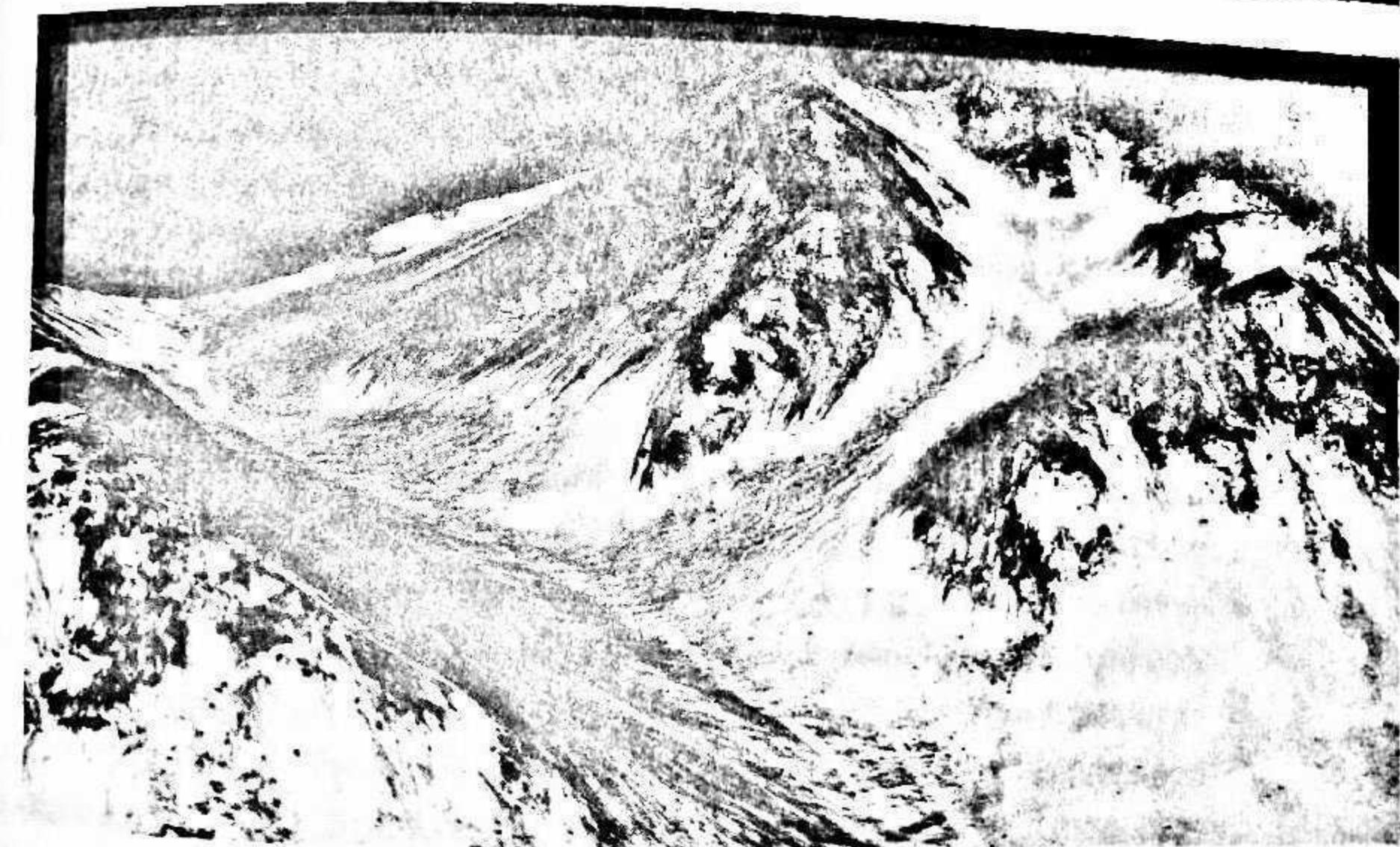
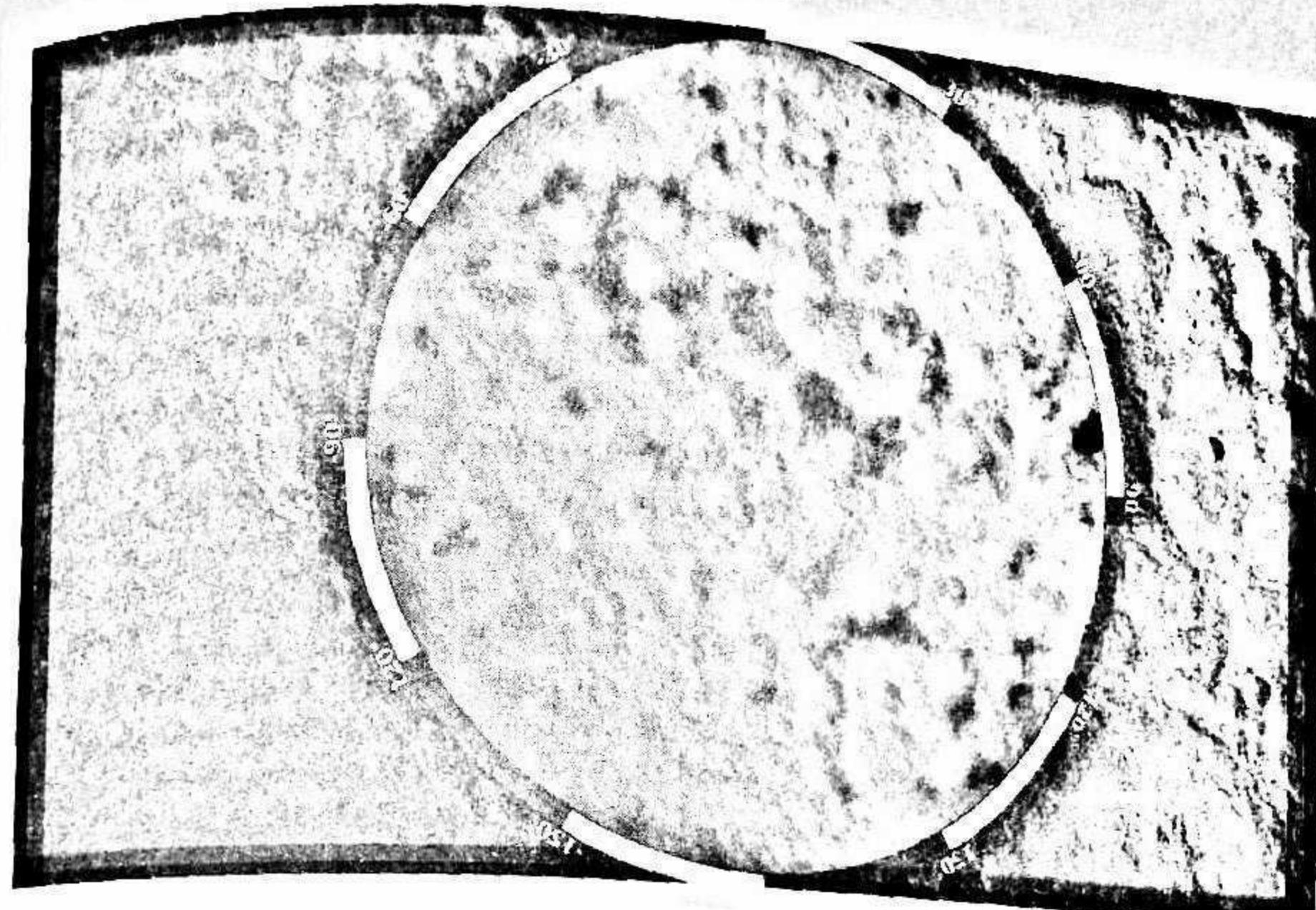
Marte sigue siendo la candidata número uno de la comunidad astrobiológica como «la roca más cercana con vida», pero hay muchos investigadores que sostienen que las lunas de Júpiter [Europa, Ganimedes y Calisto] son mejores apuestas.

SETH SHOSTAK, ASTRÓNOMO ESTADOUNIDENSE

agua se enriquezca con D. Concluyeron que el planeta una vez tuvo suficiente agua líquida como para formar un océano que ocuparía casi la mitad del hemisferio norte de Marte, alcanzando en algunas regiones profundidades superiores a 1,5 km.

Además, un grupo de investigación dirigido por Alexis Rodríguez, del Planetary Science Institute, ha aportado pruebas a favor de que dos impactos de asteroides sobre el gran océano del norte ocasionaron unos tsunamis gigantescos —de hasta 120 m de altura— hace entre 3000 y 3400 millones de años, lo que explicaría también las dificultades para identificar las líneas de costa de aquel océano. Otro equipo, liderado por François Costard, geomorfólogo planetario de la Universidad de París-Sur en Francia, cree haber identificado, además de depósitos típicos de tsunami a lo largo de la dicotomía entre el hemisferio norte y el hemisferio sur de Marte, las posibles fuentes de algunos de estos tsunamis. Estarían en Lomonosov, un cráter de impacto de 120 km de diámetro situado a cientos de kilómetros de los supuestos depósitos (figura 1).

Otros autores rebajan las expectativas y piensan que el agua marciana estaba habitualmente congelada, y que solo en conta-



Diversas misiones espaciales han realizado observaciones de la Luna, reuniendo una cantidad creciente de indicios de la presencia de agua helada en determinadas zonas. La imagen superior muestra el polo sur del satélite y las zonas que podrían albergar grandes depósitos de agua congelada, que aparecen más oscuras. Abajo, imagen procesada de una zona de Marte con huellas del paso de agua en tiempos actuales. La estructura oscura, que se puede describir como un conjunto de rayas, y que va desde el extremo izquierdo de la imagen hasta el sector central inferior, se ha formado por el flujo de agua, según las conclusiones de algunos análisis.



Ciertos lóbulos de 250 km de material oscuro podrían ser el remanente de un tsunami que azotó Marte hace unos 3 000 millones de años.

das ocasiones o épocas se fundía a causa de la actividad volcánica o de cambios en la inclinación del eje de rotación de Marte. Pero incluso en este caso, se hace necesario averiguar a dónde fue a parar tanta agua.

Hasta hace unos 3 800 millones de años, Marte debió de tener una atmósfera rica en CO₂ gracias, sobre todo, a una intensa actividad volcánica, como la que originó el monte Olimpo (que, con casi 22 km sobre la elevación media del suelo, es la montaña más alta de todo el sistema solar). Debido a ese CO₂, la presión atmosférica sería superior a la terrestre actual, y la temperatura media estaría por encima de los 0 °C. El agua líquida sería entonces muy abundante y se generarían las grandes cuencas fósiles que hoy vemos. La duda está en si el agua estaba presente de manera continua, durante decenas o incluso cientos de millones de años, o solo de forma más esporádica. Incluso en este último caso pudo aparecer la vida.

En los siguientes centenares de millones de años se inició la catástrofe que afectaría al agua líquida superficial, debido a que el CO₂ atmosférico se fue perdiendo, en parte convertido en carbonatos, a consecuencia del pequeño tamaño de Marte. Los planetas pequeños se enfrián antes que los grandes, y eso inhibe su vulcanismo y la salida de gases a la atmósfera. Y así, mientras que en la Tierra el CO₂ atrapado en forma de carbonatos iba reciclando hacia la atmósfera mediante el vulcanismo, en Marte eso no podía ocurrir y quedaba retenido de forma perenne. En la actualidad, Marte está geológicamente muerto.

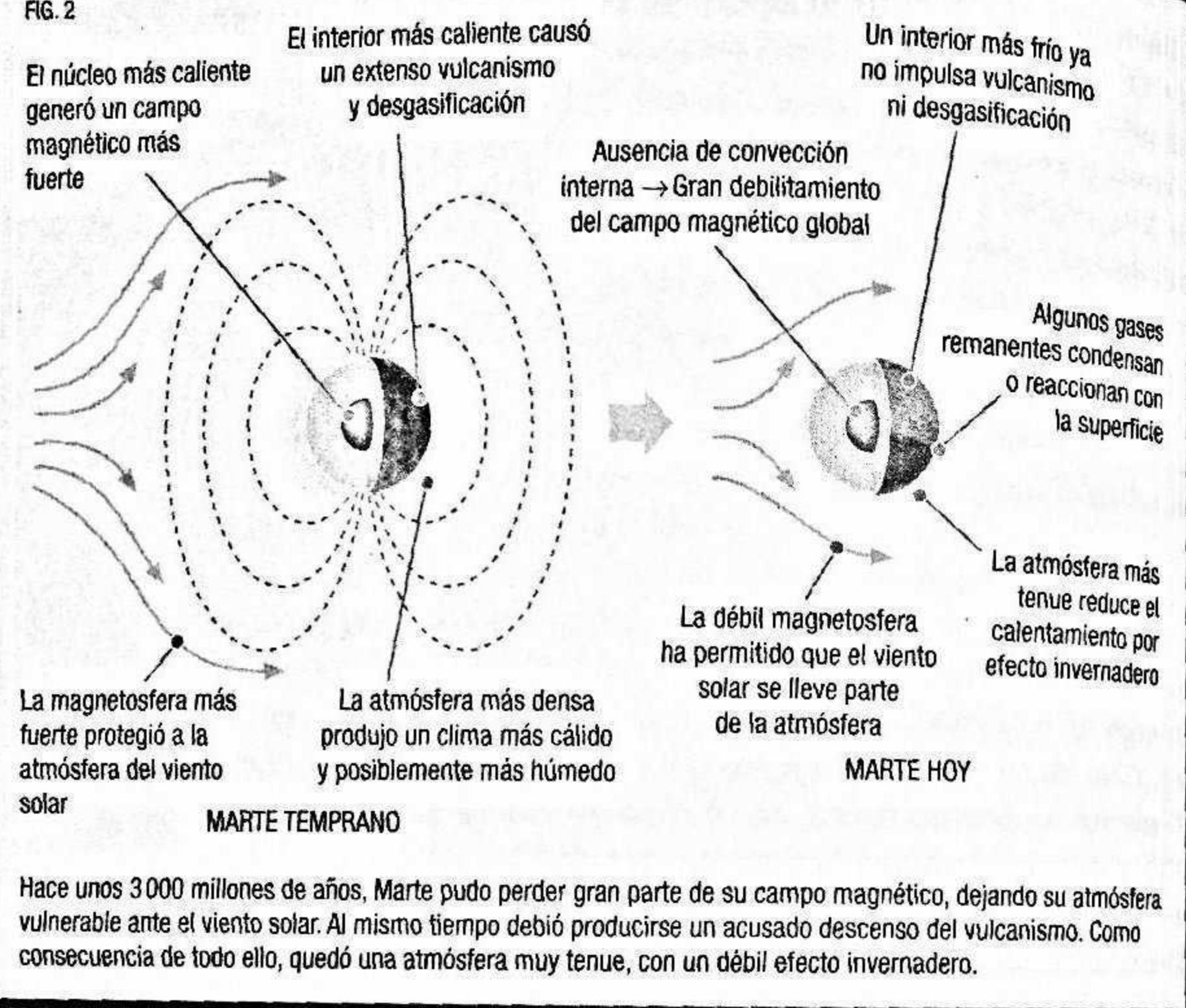
Sin embargo, recientemente se ha estimado que los carbonatos visibles en el planeta son muy insuficientes para dar cuenta de todo el CO₂ que habría cuando se formaron los valles fluviales. ¿Dónde fue a parar el resto del CO₂ «desaparecido»? Probablemente se perdió fuera, en el espacio, sobre todo hace unos 3 000 millones de años. Las moléculas de CO₂, como las de H₂O, se «rompen» por acción de la energética radiación UV, con lo que se liberan átomos de carbono y oxígeno, y estos, en la atmósfera marciana, se verían arrastrados al espacio por el viento solar... La pérdida de material al espacio está favorecida, respecto a Venus o la Tierra, por la menor gravedad marciana, que no puede retenerlo en la misma medida.

Esta pérdida también tuvo que ver, muy probablemente, con el campo magnético marciano. Marte debió de tener un núcleo de metales fundidos, como la Tierra. Se piensa que los movimientos de convección de este núcleo, junto con la rotación marciana, generaron un campo magnético suficiente para formar una magnetosfera, que protegía a la atmósfera de las partículas del viento solar. Pero el campo magnético se fue debilitando al enfriarse el planeta y cesar la convección del núcleo, con lo que la atmósfera quedó a merced del viento solar, que la arrastró en buena medida al espacio (figura 2). Añadamos además el efecto de los frecuentes impactos, que la irían «erosionando».

Marte fue una vez húmedo y fértil. Ahora está seco. Algo malo le pasó. Quiero saber lo que le sucedió para que podamos evitar que suceda aquí en la Tierra.

NEIL DEGRASSE TYSON

FIG. 2



Por otra parte, al congelarse CO_2 en las capas altas de la atmósfera, se reflejaría más radiación hacia el espacio (es decir, aumentaría el albedo) y bajaría aún más la temperatura. Finalmente, una importante fracción del CO_2 se congeló y quedó atrapado en los casquetes polares, otra parte se incorporó al suelo, y muy poco permanece en la atmósfera.

El agua debió de sufrir una pérdida similar, mediante la rotura en átomos de H y O causada por rayos UV, seguida del arrastre del hidrógeno por el viento solar. El oxígeno procedente del CO_2 y del H_2O se perdería en parte por el mismo viento solar, y el resto reaccionaría con rocas de la superficie, contribuyendo a que podamos hablar del *planeta rojo*, un tono debido principalmente al hierro oxidado.

Se calcula que el agua líquida pudo ser estable hasta hace unos 3000 millones de años, incluso solo 2000 millones. Entonces, la presión atmosférica y la temperatura superficial aún serían claramente superiores a las actuales y el agua líquida haría apariciones estacionales. Pero cuando las temperaturas máximas bajaron de 0°C , el agua líquida desapareció de la superficie, y si había vida, al menos ahí, en la superficie, se extinguío.

En definitiva, la pérdida de gran parte del CO_2 y del H_2O atmosféricos fue resultado del pequeño tamaño de Marte, que ocasionó su enfriamiento temprano y el fin del vulcanismo y la desgasificación. Marte es hoy un planeta congelado y seco por esa causa, no por estar demasiado lejos del Sol.

No obstante, como hemos visto, aún queda agua en Marte. Subsiste en los casquetes polares, y se piensa que el suelo tiene atrapada una gran cantidad de agua helada, a lo largo, tal vez, de miles de metros de profundidad. A pesar de todo, aún puede aparecer ocasionalmente agua líquida superficial. El eje de rotación de Marte sufre grandes cambios de inclinación, durante los cuales se calientan las zonas del planeta que quedan más expuestas al Sol. Si esto libera agua como vapor, se puede alimentar el efecto invernadero y es posible que el agua líquida «regrese» a la superficie con cierta abundancia. Y, de existir vida en el subsuelo (quizá en animación suspendida durante millones de años), también esta podría «retornar» a la superficie.

Ceres y los asteroides

Los asteroides son cuerpos rocosos o metálicos, generalmente pequeños, que se encuentran, en su mayoría, en el cinturón de asteroides, una región que se extiende entre las órbitas de Marte y Júpiter. Ahí hay probablemente varios millones de asteroides pequeños —de los que se han localizado cientos de miles—, y cinco cuerpos de mayor masa, entre los que destaca Ceres, que tiene casi la tercera parte de la masa del cinturón.

Cuando este último todavía estaba en formación, la línea en la que se alcanzaba el punto de condensación del agua se encon-

traba a unas 2,7 UA del Sol. Por eso, los asteroides más cercanos a nuestra estrella, compuestos por silicatos, no suelen contener agua —que se evaporó y perdió—, mientras que los más alejados, en su mayoría más ricos en carbono (carbonáceos), sí la tienen, y muchos de ellos pudieron aportarla a la Tierra.

Hasta 2006, Ceres era considerado un asteroide, pero entonces pasó a la categoría de planeta enano. En cualquier caso, orbita en el cinturón de asteroides, a una distancia de entre 2,5 y 3 UA del Sol, y tiene una estructura interna con un núcleo de silicatos y una capa de hielo rodeada por una corteza delgada. El agua puede suponer hasta la mitad de su masa. A comienzos de 2014, incluso se detectaron, con el observatorio espacial Herschel, grandes emanaciones de vapor (unas 20 toneladas por hora) que nutren una tenue atmósfera. Además, la sonda Dawn de la NASA ha observado en Ceres unos sorprendentes deslizamientos masivos de terreno, que se explican por el hielo de agua oculta.

MÁS ALLÁ DE LA LÍNEA DE HIELO

Durante la formación del sistema solar, las regiones más cercanas al Sol eran más calientes y secas que las más alejadas, que estaban lo bastante frías como para condensar el agua. La línea divisoria, llamada *línea de hielo*, estaba cerca de la órbita actual de Júpiter, y hoy es la distancia aproximada al Sol en la que el hielo de los cometas comienza a derretirse y evaporarse. Los cuerpos situados más allá probablemente tuvieron un gran impacto (en un doble sentido) sobre la vida terrestre, en particular por su aporte de agua; pero también tiene interés el agua de algunos de esos cuerpos en cuanto a su propia habitabilidad pasada... y tal vez presente.

El agua en Júpiter y sus satélites

Júpiter tiene un enorme tamaño y una gran envoltura gaseosa, muy rica en hidrógeno y helio. Bajo ella puede haber un núcleo rocoso, pero sabemos muy poco de él a ciencia cierta. En todo caso, no

hay que hacerse ilusiones con la superficie de ese núcleo respecto a la vida, pues soportaría temperaturas y presiones enormes.

En cambio, la temperatura externa de la atmósfera cae hasta unos -110 °C, y más abajo tenemos una zona «templada», lo que llevó a Carl Sagan y a otros a proponer que en ella podrían habitar microorganismos. Además, existe un rasgo químico de los planetas gaseosos que tiene un gran interés: en ellos —a diferencia de los rocosos— la forma dominante de carbono en su atmósfera no es el CO₂, sino el metano (CH₄), como en aquella simulación histórica sobre el origen de la vida denominada *experimento de Miller y Urey*. Por eso algunos presentan a los gigantes gaseosos como colosales «laboratorios naturales de química prebiótica» que emplean como fuentes de energía la luz, las descargas eléctricas, y el calor liberado desde el interior, si bien otras características, como la ausencia de interfasas líquido-sólido, hacen muy improbable que esa química pueda avanzar mucho en el camino hacia la vida.

El agua de Júpiter tiene otro atractivo. Este fue probablemente el primer planeta en establecerse, se llevó gran parte del material que no se quedó el Sol, y aún conserva material de la nebulosa solar primordial. Así que es crucial saber el agua que contiene para reconstruir la formación del sistema solar. Como dijo el director de Ciencia Planetaria de la Universidad de Michigan, Sushil Atreya: «Los planetas terrestres han cambiado a lo largo del tiempo, pero Júpiter puede contarnos los orígenes del sistema solar». De ahí la importancia de la medición de aquella agua por parte de la misión Juno de la NASA (que llegó a la órbita del planeta en julio de 2016), que también ofrecerá datos sobre el eventual núcleo joviano.

Los cuatro mayores satélites de Júpiter (Io, Europa, Ganímedes y Calisto, de más cerca a más lejos) fueron descubiertos en 1610 por Galileo, de ahí que se les conozca como satélites «galileanos». Io mantiene sorprendentes volcanes activos, pero nos importan más los otros tres en relación con el agua y las posibilidades de vida, aun careciendo de una atmósfera significativa. ¿Cómo es posible que tengan agua líquida con tan poca irradiación solar, mucho más allá del ya congelado Marte? La respuesta está en el

calentamiento producido por la *desintegración de isótopos radiactivos* —un proceso que puede generar calor durante miles de millones de años—, y sobre todo en la *energía de las mareas*.

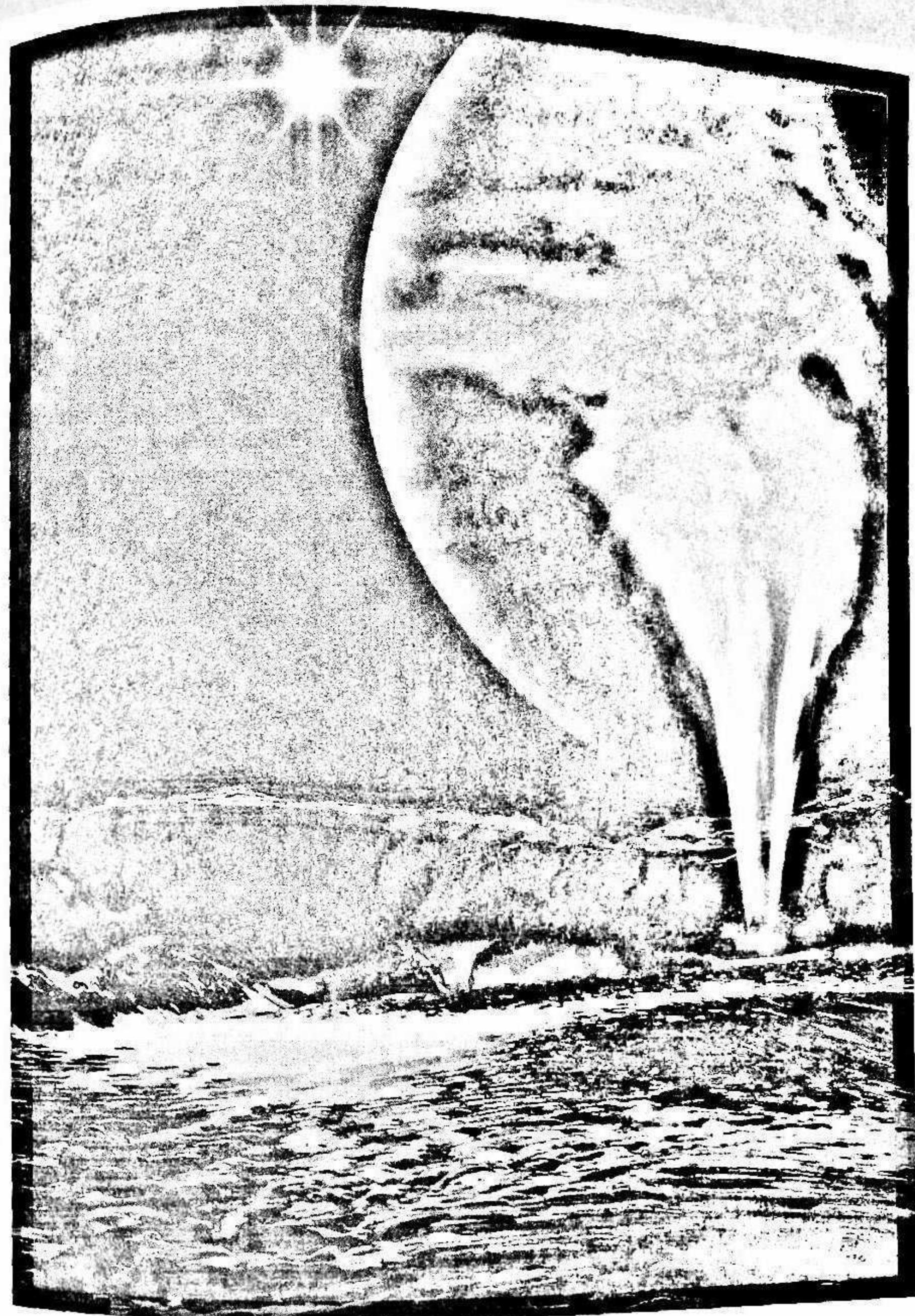
En la Tierra estamos habituados a notar las fuerzas de marea sobre grandes masas de agua. Son fuerzas causadas por la atracción gravitatoria del Sol y la Luna, que quedan en poca cosa cuando se comparan con las ejercidas por un gigante como Júpiter sobre sus satélites cercanos. En estos, dichas fuerzas de marea generan suficiente calor para mantener un océano de agua líquida bajo una capa protectora de hielo. De hecho, las mismas fuerzas son responsables del imponente vulcanismo de Ío. En la acción mareal influyen, además, las resonancias orbitales entre los distintos satélites, que son responsables de que no mantengan órbitas perfectamente circulares.

Agua en Europa

Europa presenta una superficie insólita, helada y muy plana, con multitud de grietas y pocos cráteres. Fue estudiado por las Voyager 1 y 2, y sobre todo, durante ocho años (1995-2003), por la sonda Galileo.

Tiene una atmósfera muy tenue con algo de O_2 , que seguramente procede de la rotura de moléculas de agua por efecto de las radiaciones: los átomos de O que se liberan en esta rotura —o en la del CO_2 — en parte se unen formando el O_2 . La superficie, dominada por el hielo de agua, está a unos $-160^{\circ}C$ en el ecuador y a $-220^{\circ}C$ en los polos. La ausencia de relieve superficial relevante sugiere que el agua ha ascendido desde el interior y ha formado una capa de hielo, que tiene entre 10 y 30 km de espesor, aunque podría llegar a los 100 km.

Según los datos de la Galileo, debajo de la capa de hielo parece haber un océano salado, que puede llegar a tener el doble de masa que los terrestres, y estaría implicado en el campo magnético del satélite. La existencia del océano interno encaja con el reciente hallazgo del telescopio espacial Hubble de lo que parecen siete grandes géiseres —de hasta 200 km de altura— en el hemisferio



Recreación artística de un chorro de vapor de agua escapando desde el subsuelo de Europa, con la imagen de Júpiter y el Sol en un segundo plano.

sur (véase la imagen de la página anterior). De confirmarse, ofrecerán en el futuro la excitante posibilidad de obtener muestras del océano interno sin necesidad de perforar la capa de hielo.

El océano interno podría tener temperaturas, presiones y una química orgánica compatibles con una hipotética actividad biológica. Por todo ello, Europa suele mencionarse entre los tres cuerpos del sistema solar de mayor interés astrobiológico —los otros dos son Marte y Encélado—. La química prebiótica a bajas temperaturas tiene sus defensores, a pesar de que muchas reacciones de interés sean más lentas. Además, en la corteza helada se han encontrado silicatos, presumiblemente procedentes del impacto de asteroides o cometas que pudieron aportar materia orgánica.

En definitiva, no parece fácil que se haya originado vida en Europa, pero sigue habiendo una probabilidad no despreciable. En cambio, no se aprecian grandes dificultades en la teoría de que, gracias a las adaptaciones de algunos organismos terrestres (como los que habitan en el lago subglacial Vostok, de la Antártida), estos pudieran sobrevivir si se les introdujera en un océano «europeo». En el fondo de este puede haber, además, áreas de transferencia de materiales y calor análogas —aunque de magnitud muy inferior— a las chimeneas termales de los océanos terrestres.

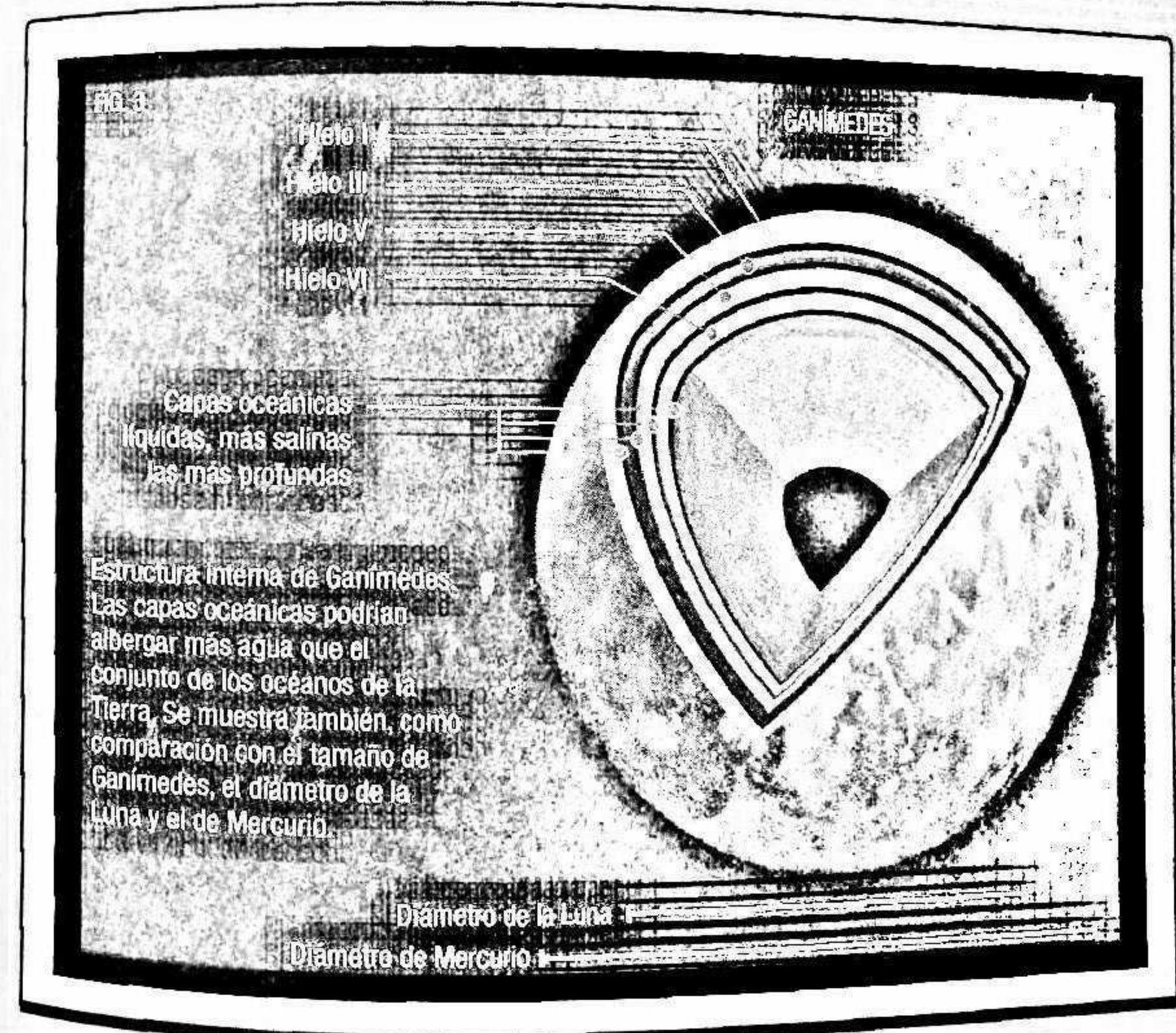
Aprenderemos mucho sobre la habitabilidad de Europa mediante la misión JUICE (siglas en inglés de Explorador de las Lunas Heladas de Júpiter) de la ESA, con un lanzamiento propuesto para 2022 y una llegada en 2030, que estudiaría Júpiter y sus lunas Europa, Ganímedes y Calisto. Además, está en proyecto la Misión de Sobrevuelos de Europa (del inglés, EMFM), de la NASA, cuyo lanzamiento se planea para 2022-2023, y en la que tal vez la ESA colabore con un «penetrador» del suelo (CLEP).

Ganímedes y Calisto

Ganímedes es el mayor satélite del sistema solar —tiene 5268 km de diámetro, un 8% más que Mercurio—, y Calisto no es mucho más pequeño —posee un diámetro un 1% menor que Mercurio—.

Dado que la densidad de Ganímedes es menor que la de Europa (unos 2/3), podría tener más agua incluso que esta luna. La sonda Galileo detectó en 2002 un campo magnético propio (único entre los satélites del sistema solar) que debe estar producido por el movimiento de una gran capa de agua líquida muy salada, y por la presencia de un núcleo metálico. Del análisis de las auroras que produce ese campo —vistas con el telescopio espacial Hubble— se colige que el océano ganímediano tiene unos impo- nentes 100 km de profundidad.

Inicialmente se pensaba que este océano está situado sencillamente entre dos capas heladas, pero ahora se habla de una estructura tipo «sándwich club», con varias capas y diversas formas de hielo (figura 3). Podría haber contacto directo entre la más densa de las capas de agua salada y el corazón rocoso, una



interfase mucho más interesante para la vida que las de roca-hielo o hielo-agua. Por otro lado, el Hubble ha encontrado en Ganímedes algo de oxígeno (O_2) en su tenue atmósfera, pero esto ya no nos sorprende: como en Europa, debe proceder sobre todo de la rotura de las moléculas de agua por la radiación incidente.

Habrá que esperar a 2030 para que la misión JUICE confirme o no todo lo anterior, y sin duda habrá novedades de interés.

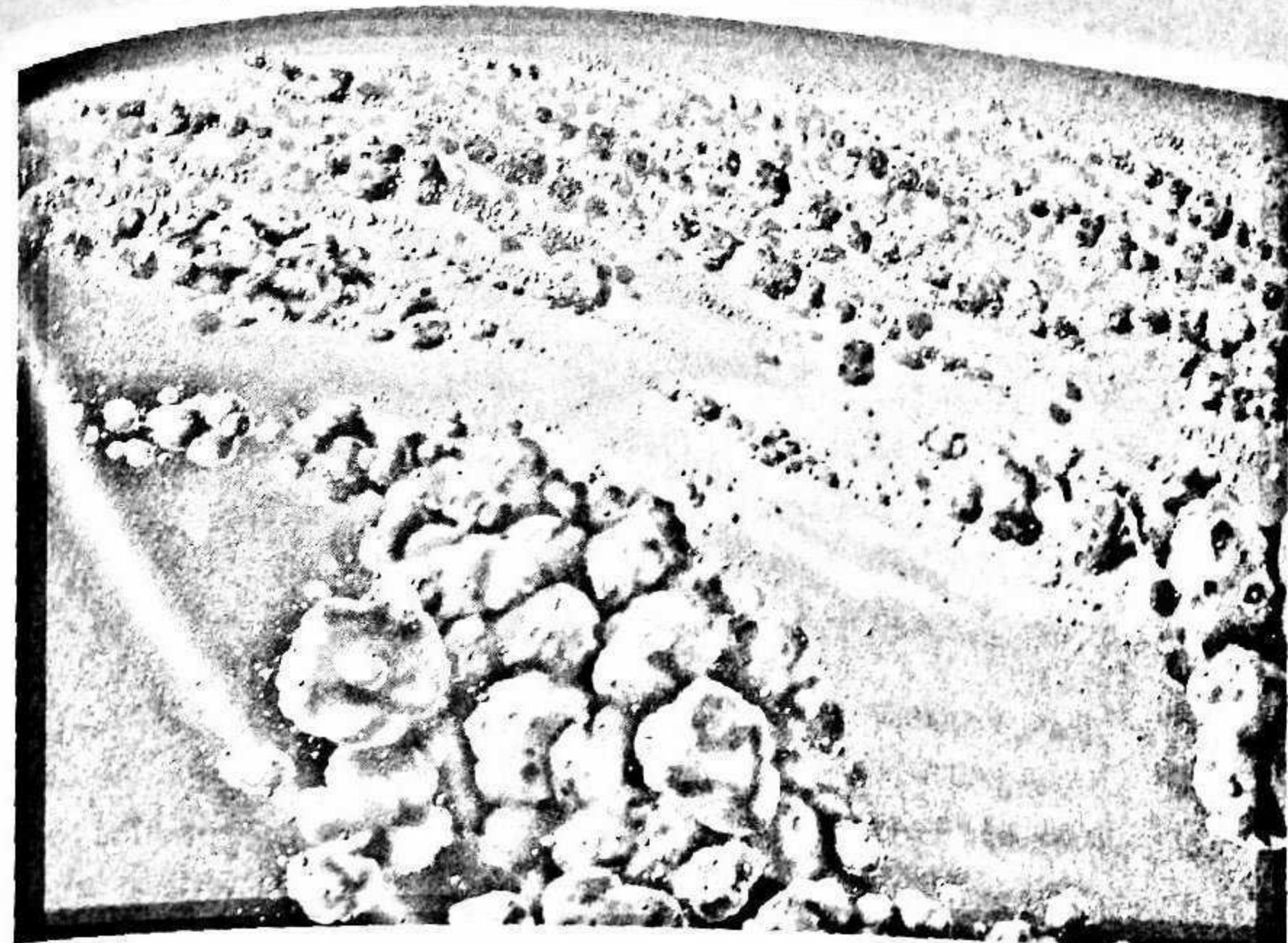
Calisto también parece tener un océano salado profundo, pero solo calentado por la radiactividad, pues su lejanía respecto a Júpiter hace que las fuerzas de marea sean poco relevantes. Esto, junto con la probable falta de contacto entre el agua líquida y el núcleo rocoso, lo hacen parecer poco habitable. De todas formas, sí puede ser un buen lugar para establecer una base humana de exploración.

Del anillado Saturno al atigrado Encélado

Debajo de la capa de nubes superior de Saturno, se cree que hay otra cubierta de nubes rica en hidrosulfuro de amonio y agua. De modo que puede haber agua en Saturno, pero no mucha. Sin embargo, cerca de él sí abunda; los anillos que lo rodean están casi enteramente hechos de hielo de agua, en pedazos de tamaño muy diverso, desde polvo a grandes bloques (imagen superior de la página contigua). Y las lunas de Saturno tienen también grandes cantidades de este hielo.

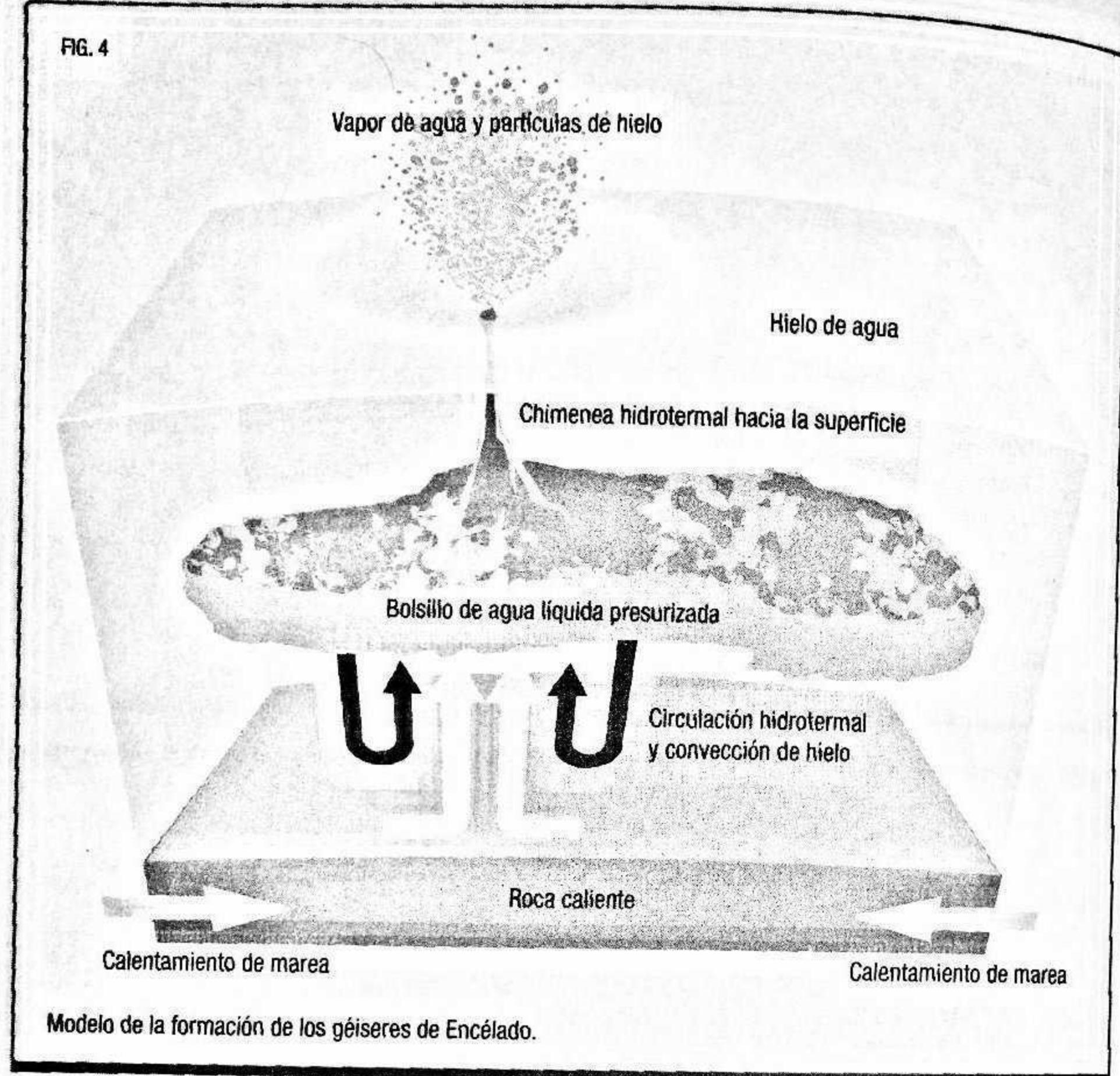
Encélado es la sexta mayor luna de entre las decenas que tiene este planeta, pero tal vez sea la primera en habitabilidad. Aparece como una bola de 500 km de diámetro, blanca, helada, y sometida a intensas fuerzas de marea provocadas por Saturno y otro satélite, Dione, con el que presenta *resonancia orbital* (por cada dos vueltas de Encélado alrededor de Saturno, Dione da una).

Es probable que estas fuerzas hagan que Encélado tenga al menos algunas condiciones para el desarrollo de vida, como océanos entre una capa de hielo y un núcleo rocoso, en los que el agua se calienta por energía mareal y actividad geotérmica (figura 4). En 2005, la Cassini encontró 101 enormes géiseres en su



Arriba, recreación artística del material del que están hechos los anillos de Saturno. Los tamaños de los trozos constituyentes van desde el de granos de polvo hasta el de grandes rocas, y tienen un alto contenido de hielo de agua. En la imagen inferior, correspondiente a un sector de Encélado, se aprecian las célebres «rayas de tigre». Son las estructuras calificables de grietas, levemente curvadas y más o menos paralelas.

FIG. 4



polo sur. Surgen de cuatro grandes fracturas a las que se conoce como «rayas de tigre» por su aspecto, cada una con unos 130 km de longitud, 2 km de anchura y 500 m de profundidad (imagen inferior de la página anterior). Expulsan gases con agua, CO₂, CO, metano, amoniaco, sales y sustancias orgánicas mal caracterizadas: todo un «cóctel» de posible interés probiótico. La temperatura —a veces cercana a los 100 °C— y la presión de las emisiones indican una fuente caliente bajo la superficie. Todo esto, junto con los datos gravimétricos, apoya la existencia en el hemisferio sur, bajo 15 a 25 km de corteza helada, de un océano líquido.

UNA FAMILIA NUMEROSA DE TIPOS DE HIELO

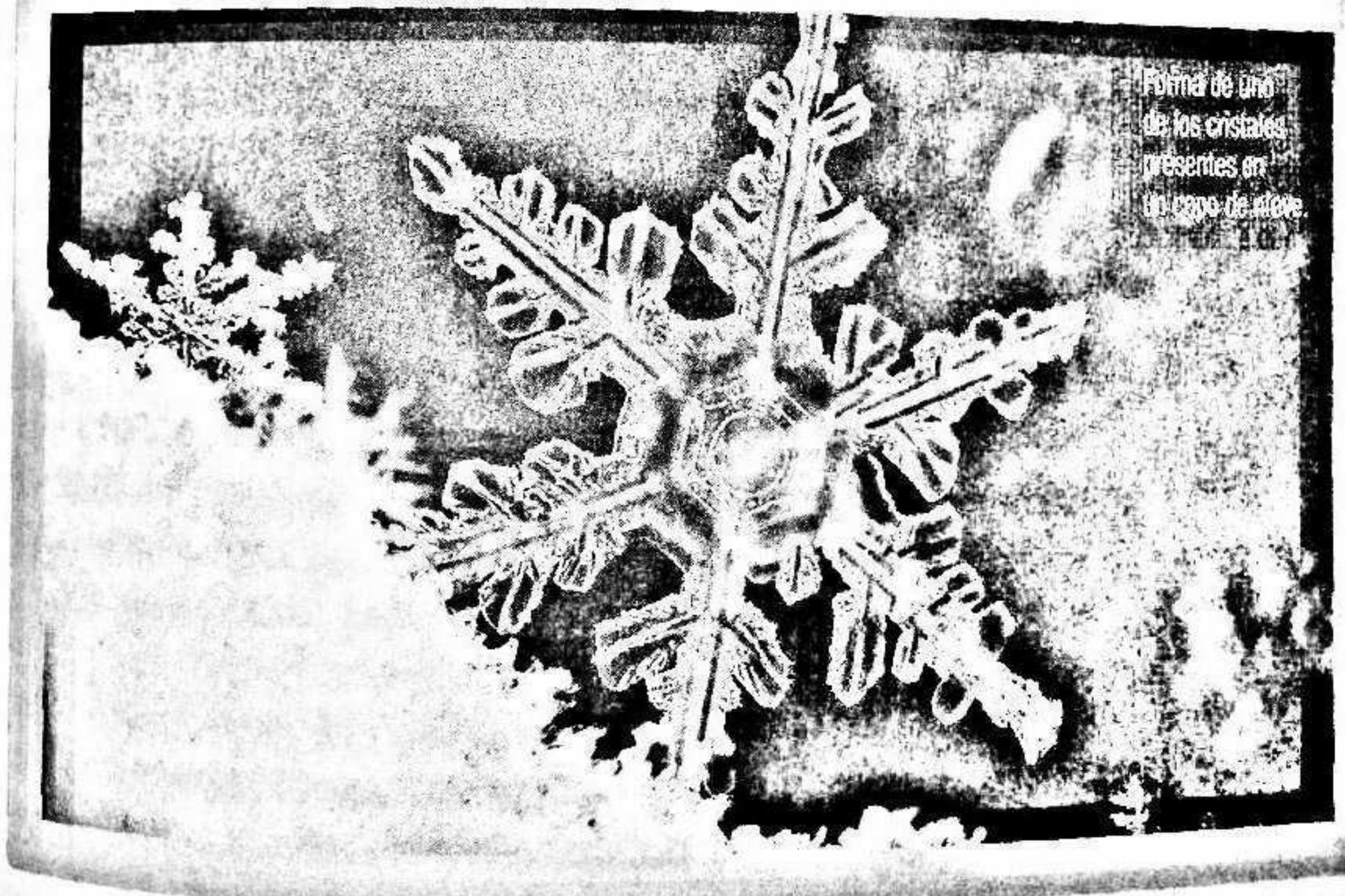
En el hielo, las moléculas de agua aparecen ordenadas, pero pueden estarlo de diferentes formas dependiendo de la presión y de la temperatura. Hoy se conocen 16 tipos de hielo, que tienen propiedades distintas. Todo el que vemos en la naturaleza es del tipo Ih, salvo una pequeña cantidad de Ic (de simetría cúbica, menos denso), que en cambio parece abundar en el resto del sistema solar. Los cristales de Ih tienen simetría hexagonal, como se manifiesta de manera tan bella en los copos de nieve.

Mayor densidad

Las demás formas de hielo (II a XV, según el orden de descubrimiento) son más densas que el Ih, por lo que, a diferencia de este, se hundirían en el agua. El hielo más denso es el VII (hielo caliente). Las desiguales densidades se deben a las distintas maneras de empaquetarse que tienen las moléculas de agua a altas presiones y diversas temperaturas. Algunas formas, como la última conseguida en el laboratorio (la XV), no pueden existir de forma natural en la Tierra, pero tal vez sí se hallen en otros planetas o satélites.

El hielo interestelar

Además de las variantes cristalinas, también existen varias formas de hielo amorfo (o agua vitrea), formado a presiones y temperaturas muy bajas y, gracias a su estructura desordenada y porosa, con una alta capacidad de atrapar gases. Es el hielo que predomina en el frío medio interestelar y tal vez en el conjunto del universo. Cristaliza en hielo cúbico al aumentar la temperatura, liberando los gases atrapados. Hay varios tipos, con diferentes densidades.



no interno de agua líquida salada. Incluso podría ser un océano global.

En 2017, el resultado del análisis de las emanaciones de los géiseres capturadas años antes en un fugaz sobrevuelo de la Cassini, a solo 49 km de la superficie, ha mostrado una composición (sobre todo, hidrógeno) indicativa de actividad hidrotermal en el océano subterráneo. Lamentablemente, la nave no iba equipada con instrumentos capaces de detectar vida.

En resumen, hay agua, flujos de energía y materia, y compuestos orgánicos, todos ellos requisitos básicos para la vida. ¿Podrían esas ubicaciones hidrotermales sostener una vida semejante a la que se halla en la Tierra en torno a las fumarolas? Para algunos científicos, Encélado se ha convertido, como único sitio fuera de la Tierra en el que se ha demostrado actividad hidrotermal, en el lugar no terrestre más habitable del sistema solar. Hay diversos proyectos para analizar a finales de la década de 2020 la habitabilidad de su océano interno, así como indicios de actividad biológica en las emisiones de los géiseres.

El «experimento» de Titán

Titán, la mayor luna de Saturno y la segunda en tamaño del sistema solar —tras Ganímedes— tiene unas características únicas y del mayor interés entre los satélites del sistema solar. Únicamente él dispone de una atmósfera considerable además de una superficie sólida, siendo prometedor desde el punto de vista biológico, pero con un ambiente singular, muy diferente al de otros satélites. Las expectativas de habitabilidad aumentaron con los datos que aportó la misión Cassini-Huygens. La Cassini llegó a Saturno y sus satélites en 2004, y su sonda Huygens descendió poco después sobre la superficie de Titán.

La atmósfera de este último tiene en la superficie una presión un 50% superior a la terrestre, y se compone de un 95% de nitrógeno, casi un 5% de metano, y de hidrógeno y otros gases en mucha menor proporción. Hay nubes notables, probablemente de metano, etano y otros compuestos orgánicos simples. Otros son

más complejos y escasos, sobre todo los hidrocarburos aromáticos policíclicos, formados en las capas altas, a los que puede deberse el color anaranjado que se aprecia desde el espacio y la permanente niebla rojiza-anaranjada. El ciclo del metano incluye lluvias que alimentan (junto con el etano y otros hidrocarburos) ríos, multitud de lagos y mares, que se mantienen líquidos gracias a temperaturas en torno a -180 °C. Son, hasta el momento, las únicas masas líquidas superficiales descubiertas fuera de la Tierra.

En el hemisferio norte destacan tres mares grandes y normalmente calmados. Existen asimismo grandes dunas de materia orgánica, sobre todo en el ecuador. Como fuentes de energía en Titán, destacan la luz UV, los electrones de la magnetosfera de Saturno y los rayos cósmicos. En conjunto, para algunos científicos Titán se asemeja a un gigantesco experimento Miller-Urey y a la Tierra primitiva, pero hay que advertir que en ambos había mucha más agua, en forma de vapor y líquida, y mayor temperatura. Las reacciones en la superficie de Titán serán lentas debido a las bajas temperaturas, aunque es cierto que esto puede proteger a las moléculas termolábiles (que se descomponen por el calor).

Curiosamente, la casi ausencia de agua líquida en la superficie de Titán lo apartaría, en principio, del foco de interés preferente de la NASA, expresado en su divisa de «sigue el agua». La vida en un medio de hidrocarburos sería muy distinta a la que conocemos, aunque también cabría esperar una evolución por selección natural, y probablemente diversas convergencias bioquímicas y estructurales.

En todo caso, las posibilidades de vida basada en el agua en Titán no son nulas, pues de entrada cuenta con la emitida por *criovolcanes*, y los datos de la Cassini-Huygens mostraron que esa luna también puede tener un océano subterráneo de agua y amoniaco líquidos, a unos 100 km de profundidad, entre capas de hielo (figura 5).

La vida basada en el agua es una visión muy geocéntrica, cuando podríamos expandir esos límites aquí mismo, en nuestro sistema solar. Tenemos, por ejemplo, los mares de metano de Titán.

ELLEN STOFAN

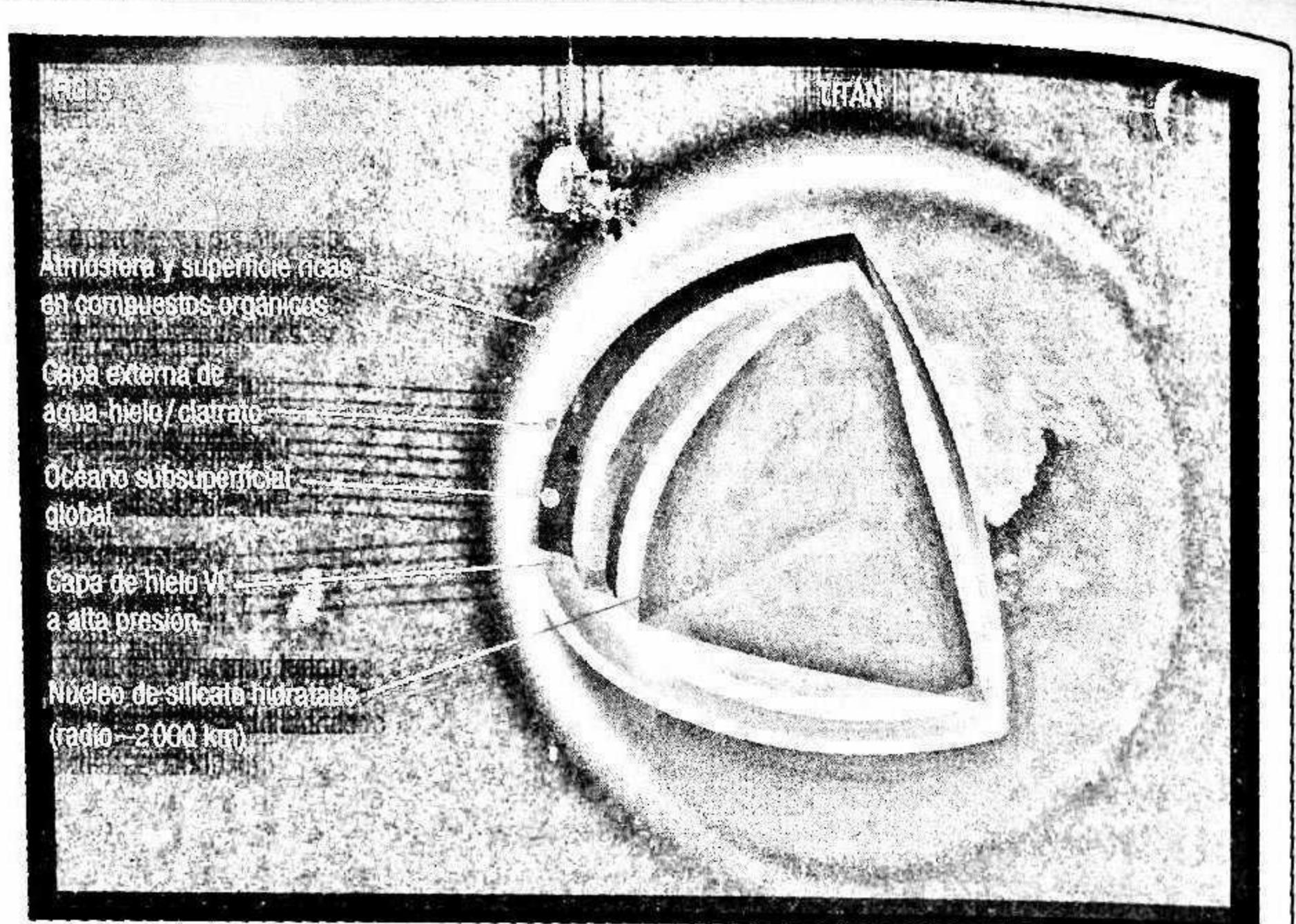


Ilustración de la posible estructura interna de Titán, según estimaciones del equipo de Dominic Fortes, del University College de Londres, que incorpora datos obtenidos por la nave Cassini de la NASA. El manto consiste en capas heladas; una, más cerca del núcleo, es una capa de hielo VI de alta presión, y otra es una capa externa de hielo encima del océano subsuperficial.

Sería del mayor interés que una nave se posara en Titán y analizara *in situ* su atmósfera, lagos, mares y dunas. Lamentablemente, no hay planes concretos para hacer este proyecto realidad en los próximos años.

Dione

Hace poco que un estudio del Observatorio Real de Bélgica dirigido por Mikael Beuthe, en el que analizan datos de la misión Cassini de la NASA, ha encontrado que Dione puede albergar también un enorme océano subterráneo. Parece que los datos de gravedad, y otros, tomados por la Cassini, solo se explican

si el material superficial flota sobre un océano de agua situado 100 km más abajo que, con varias decenas de kilómetros de profundidad, descansaría sobre un gran núcleo rocoso. Este contacto entre el océano y el núcleo rocoso es crucial para las posibilidades de vida. Dione sería, por tanto, muy similar a su vecino más pequeño, Encélado. Otros satélites de Saturno con posibles océanos subterráneos, aún poco estudiados, son Mimas y Rea.

Urano y Neptuno

Las composiciones de Urano y Neptuno son diferentes de las de Júpiter y Saturno, de modo que, aunque siguen predominando en sus atmósferas el hidrógeno y el helio, seguidos del metano, en conjunto el hielo aventaja a los gases, y por eso se habla de «gigantes de hielo» en vez de gigantes gaseosos. Se especula con que tengan una capa de *agua superiónica* en la que las moléculas de agua se descompondrían en una «sopa» de iones de hidrógeno y oxígeno.

Urano tiene una atmósfera extremadamente fría (se encuentra a unos -200 °C de media), con capas en las que va habiendo más agua y menos metano conforme más bajas son. Se conoce mal la estructura interna, pero puede ser que tenga mucha agua en un manto de «hielo». Sin embargo, aunque se use este término, no se trataría de un hielo convencional, sino de un líquido a miles de grados, denso y de conductividad eléctrica alta, que además de agua tendría amoniaco y otros compuestos. A pesar de que se habla de un posible núcleo relativamente pequeño, no está claro que exista una superficie sólida bien definida.

Aunque Neptuno recibió el nombre del dios romano del mar por tener el color del agua, su color azul verdoso se debe —como el de Urano— al metano. Es ligeramente más pequeño que este último, y su estructura es similar, pero con más manto y menos envoltura gaseosa, por lo que es más denso y masivo. También su atmósfera es rica en hidrógeno y helio, con mayor proporción de agua a medida que se desciende. Bajo la atmósfera hay un enorme y peculiar manto, que se describe como un «océano» denso y

caliente, con alta conductividad eléctrica, rico en agua, amoníaco y metano. Y debajo del océano, que llega a miles de kilómetros de profundidad, parece haber un núcleo rocoso rico en hierro.

Tritón, a «contracorriente»

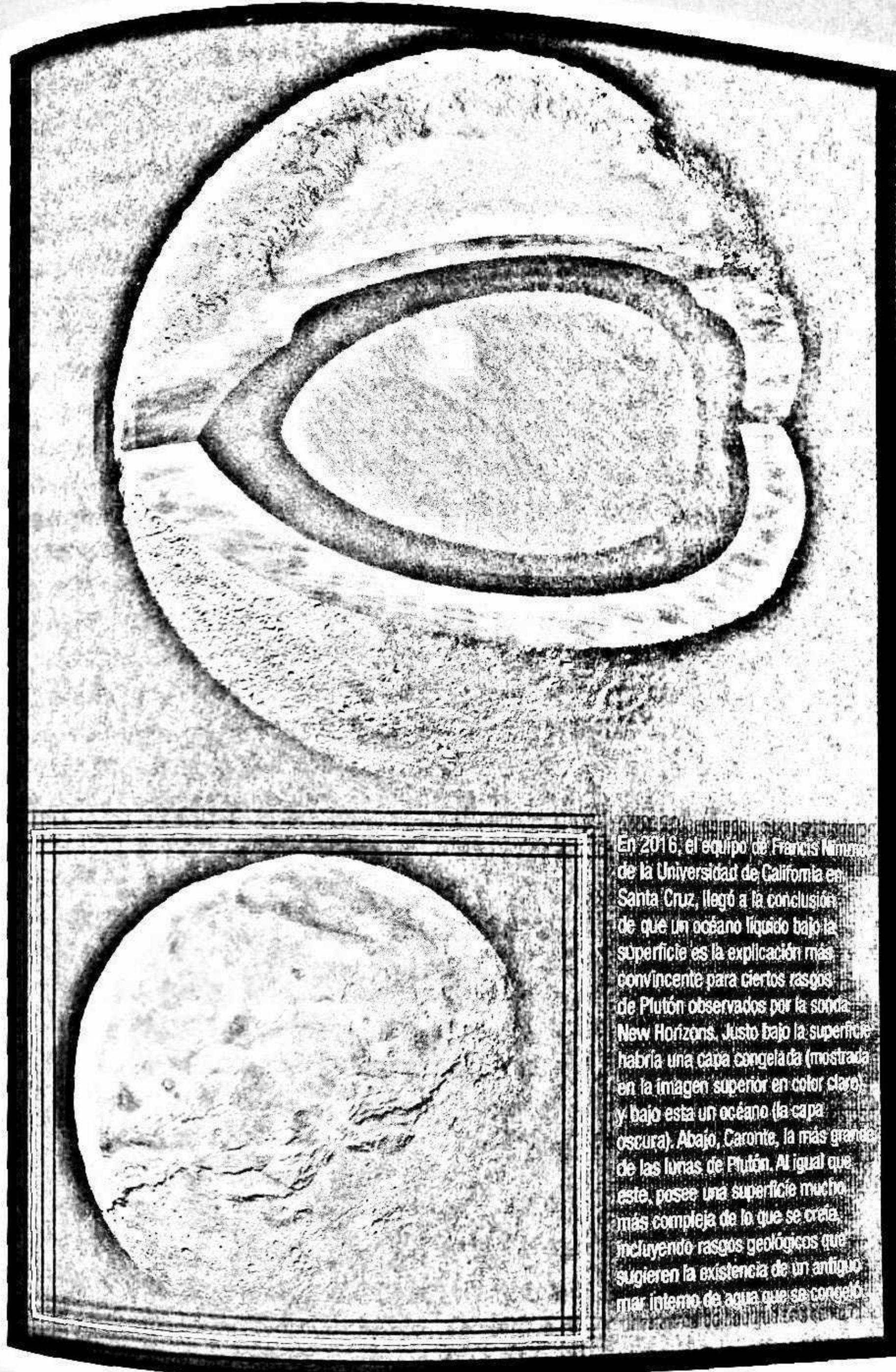
Tritón es el mayor satélite de Neptuno, casi tan grande como nuestra Luna, y aparece como una anomalía, por tener una *órbita retrógrada*, es decir, por girar en torno al planeta al revés que los demás satélites. Por eso se piensa que debe ser un cuerpo «extraño», quizá procedente del *cinturón de Kuiper*, que fue atrapado por la gravedad de Neptuno.

Está geológicamente activo y posee una atmósfera tenue. Puede que en Tritón se encuentre, entre el núcleo y una corteza de hielo superficial, un océano subsuperficial rico en amoníaco, nitrógeno líquido, e hidrocarburos de bajo peso molecular, como el metano. Este océano abre, para algunos, una oportunidad para que Tritón pueda alojar vida basada en el silicio, pues en esas aguas amoniacales podría haber silanos en concentraciones significativas, pero la presencia de agua y probablemente de diversos compuestos orgánicos hace que la posibilidad sea remota. En definitiva, la probabilidad de que exista vida en las profundidades del mar de Tritón se antoja mucho menor que la de otras lunas, aunque no debemos descartarla.

Otros planetas enanos, pero quizá grandes en agua

Antes de 2006, Plutón (con un diámetro de 2374 km) era un planeta y Ceres (950 km) un asteroide. En agosto de ese año, en una discutida decisión de la Unión Astronómica Internacional, ambos igualaron su estatus como planetas enanos —junto con Eris, Makemake y Haumea—. Y si ya nos sorprendió Ceres por su abundancia de agua, ahora es el turno de Plutón.

Plutón, en el cinturón de Kuiper, fue estudiado en 2015 por la nave New Horizons (Nuevos Horizontes) de la NASA. Tiene, bajo



En 2016, el equipo de Francis Nimmo de la Universidad de California en Santa Cruz, llegó a la conclusión de que un océano líquido bajo la superficie es la explicación más convincente para ciertos rasgos de Plutón observados por la sonda New Horizons. Justo bajo la superficie habría una capa congelada (mostrada en la imagen superior en color claro) y bajo esta un océano (la capa oscura). Abajo, Caronte, la más grande de las lunas de Plutón. Al igual que este, posee una superficie mucho más compleja de lo que se creía, incluyendo rasgos geológicos que sugieren la existencia de un antiguo mar interno de agua que se congeló.

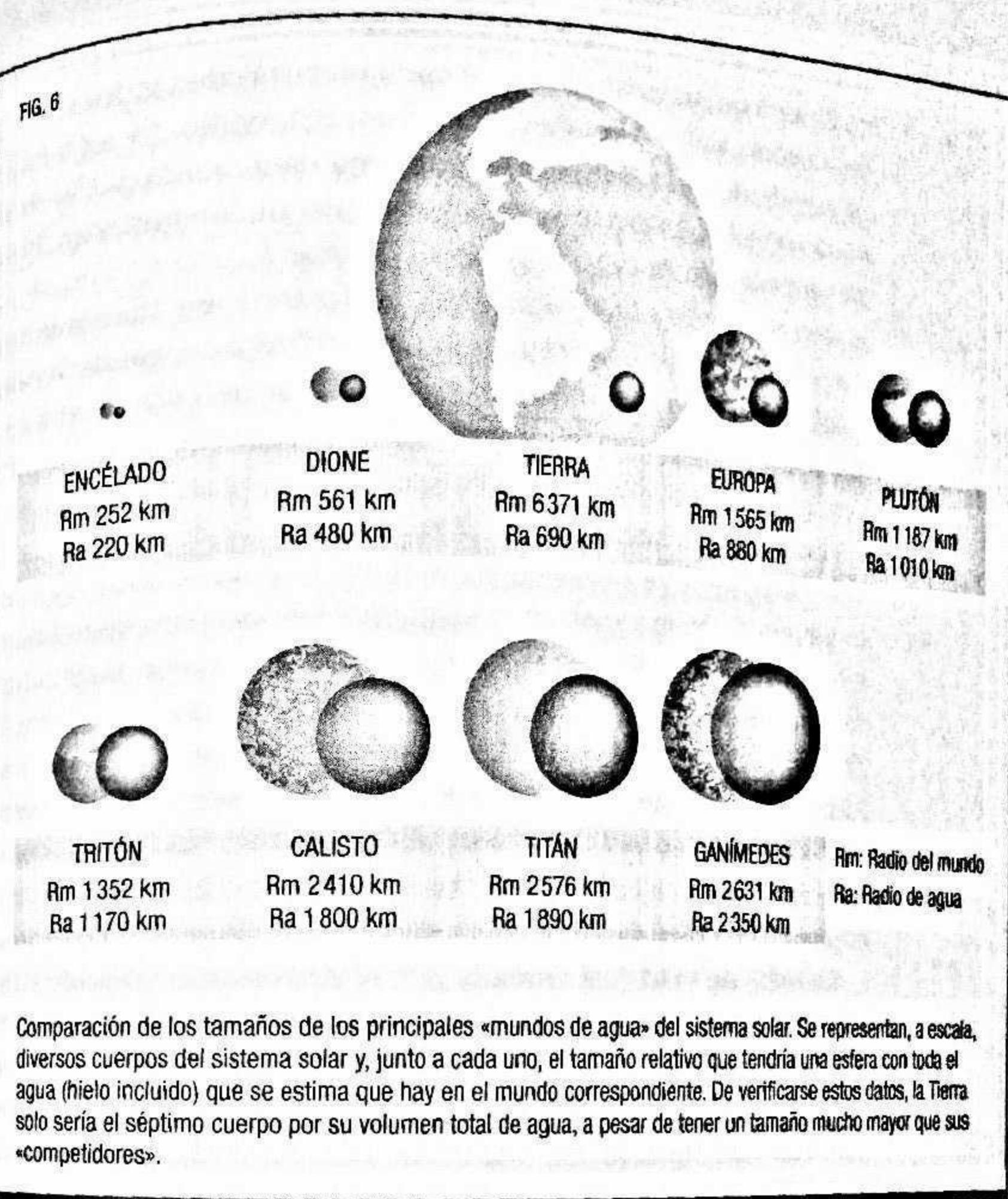
una superficie con hielos de nitrógeno y metano, una estructura interna que incluye un manto rico en hielo de agua —tal vez incluso hielo II— y una región más profunda de roca (imagen superior de la página anterior). La expansión del agua del manto al congelarse sería responsable de las grandes fracturas que se observan en la superficie. Lo más interesante es que la desintegración de elementos radiactivos podría calentar el hielo lo suficiente para que haya agua líquida y se mantenga un océano subsuperficial —entre el núcleo y el manto— de unos 100 a 180 km de espesor. También se ha detectado una exigua atmósfera con nitrógeno, metano y monóxido de carbono.

La New Horizons estudió asimismo en 2015 el satélite mayor de Plutón, Caronte (imagen inferior de la página anterior). Las largas cadenas de valles de hasta 6,5 km de profundidad y otros datos llevan a pensar que pudo tener, cuando estaba más caliente, un océano subsuperficial que ayudó a generar grandes fracturas al congelarse y expandirse —la NASA compara a Caronte con «el increíble Hulk», por cómo rompe su camisa Bruce Banner, el personaje de cómic, cuando se transforma y agranda—. Hoy solo quedaría una superficie de hielo de agua, y se discute si en su interior se diferencian un manto y un núcleo, y si quedan *criogeiseres* y criovolcanes activos.

Después de estos estimulantes hallazgos, no sorprenderá que también se baraje la posibilidad de que otros cuerpos *transneptunianos*, como el planeta enano Eris —casi tan grande como Plutón, y más masivo—, tengan océanos subterráneos gracias al calor de las desintegraciones radiactivas. La porción de la Tierra que es agua puede parecernos muy grande, por cubrir buena parte de la superficie, pero esta sustancia representa un porcentaje mucho mayor del volumen de otros astros (figura 6).

El agua de los cometas

Atendiendo la definición hecha por el astrónomo estadounidense Fred Whipple (1906-2004), los cometas son llamados con frecuencia «bolas de nieve sucia» porque consisten principalmente



Comparación de los tamaños de los principales «mundos de agua» del sistema solar. Se representan, a escala, diversos cuerpos del sistema solar y, junto a cada uno, el tamaño relativo que tendría una esfera con toda el agua (hielo incluido) que se estima que hay en el mundo correspondiente. De verificarse estos datos, la Tierra solo sería el séptimo cuerpo por su volumen total de agua, a pesar de tener un tamaño mucho mayor que sus «competidores».

en hielo de agua salpicado de escombros rocosos y gases congelados. Su alto contenido en compuestos volátiles hace que, cuando se aproximan al Sol, exhiban una larga cola de chorros de gas y vapor, empujados por la corriente de partículas de alta energía procedente de la estrella.

Hay dos grandes regiones de suministro de cometas en el sistema solar: el cinturón de Kuiper y la *nube de Oort*. El primero —que recibe su nombre en honor al astrónomo Gerard Kuiper— es una región que se extiende desde la órbita de Neptuno hasta

el espacio profundo —sobre todo, entre 30 y 50 UA—, y contiene gran parte de los restos helados que quedaron tras la formación del sistema solar. Suponiendo que, en promedio, la mitad del contenido de sus cuerpos sea agua, esta equivaldría al 5% de la masa terrestre. La mayoría de los cometas de la familia de Júpiter proceden de él.

Recientemente, la misión espacial Rosetta ha determinado que el hielo del kuiperiano cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, o «Chury», es cristalino, por lo que no es más antiguo que el sistema solar; si fuera más antiguo (procedente del medio interestelar), sería hielo amorfo. Ese hielo, al encerrar gases, forma los llamados *clatratos*.

Por otro lado, se pensaba que la temperatura de esos cuerpos en ningún momento aumenta lo suficiente como para que el hielo de sus núcleos se derrita. Pero en un análisis de granos de polvo del cometa Wild-2 (que parece kuiperiano), traídos en 2006 a la Tierra por la misión Stardust, se encontraron minerales que se formaron en presencia de agua líquida, a temperaturas de entre 50 y 100 °C. La sorpresa lleva a pensar en dos candidatos como fuentes de calor en los cometas: las pequeñas colisiones con otros objetos y la desintegración radiactiva de sus propios elementos.

La nube de Oort (así llamada por el astrónomo holandés Jan Oort) es una región esférica que se extiende más allá de Neptuno, quizás hasta casi la mitad de la distancia que nos separa de Alfa Centauri. Se estima que hay en ella entre uno y cien billones (10^{12} - 10^{14}) de objetos, con una masa total entre 0,2 y 20 veces la de la Tierra. Si se acepta que también la mitad de estos cuerpos es hielo, su cantidad total de agua oscilaría entre 0,1 y 10 masas terrestres.

Las perturbaciones gravitatorias del cinturón de Kuiper y de la nube de Oort parecen la causa de la aproximación al Sol de la mayoría de los cometas de periodo corto y largo, respectivamente, que han podido contribuir de manera significativa a las reservas de agua de la superficie terrestre.

Como hemos visto, no solo abunda el agua helada en el sistema solar, sino que también lo hace el agua líquida, incluso en lugares en los que, por su lejanía con el Sol, no esperaríamos

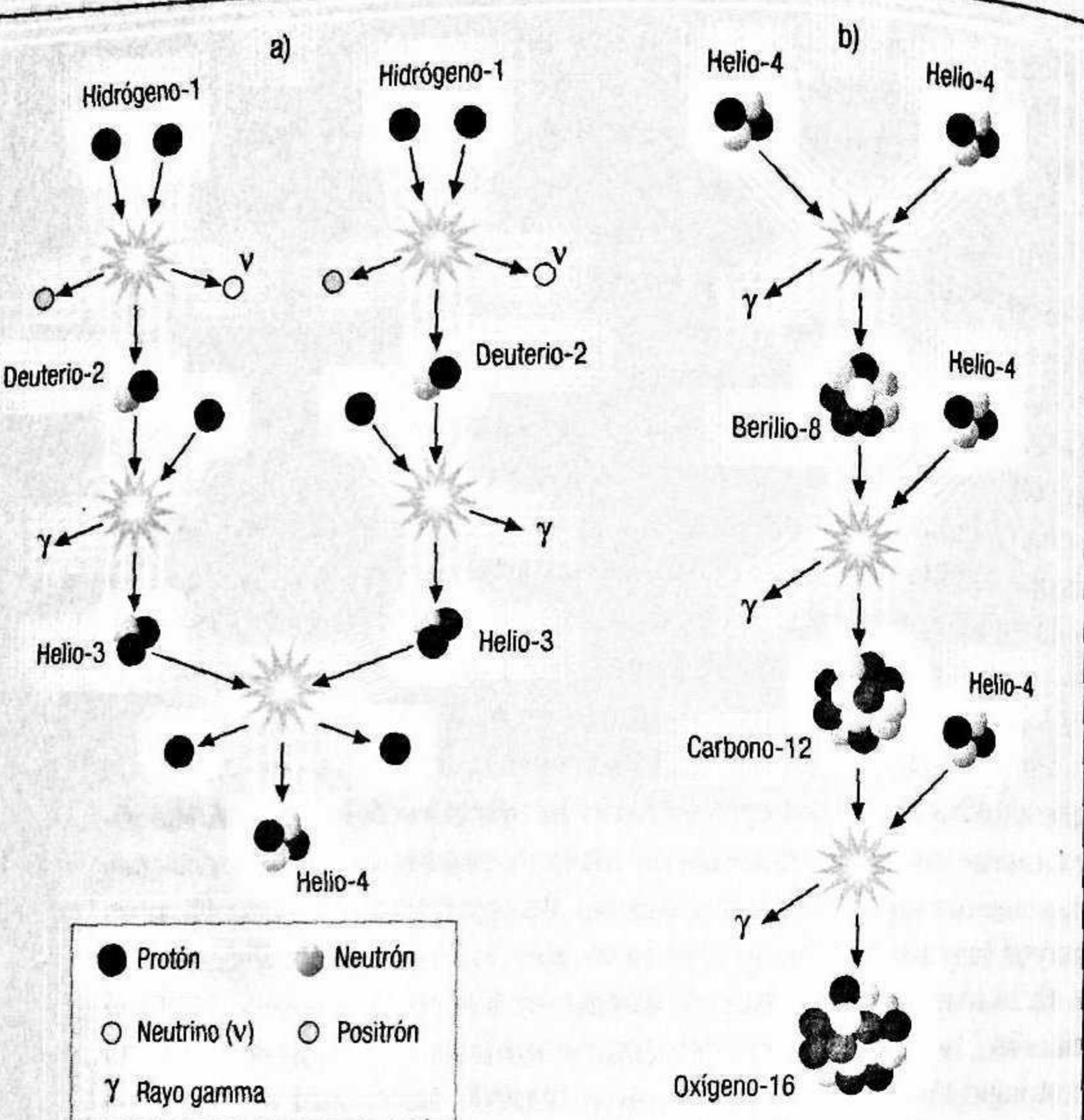
que pudiera existir. ¿Es posible que en alguno de ellos se haya generado vida? La aparición de seres vivos tal como los conocemos necesita, además de agua, suficientes fuentes de energía y de compuestos carbonados, y probablemente superficies productivas roca-agua, de modo que merecerá la pena buscar los ambientes propicios. A los candidatos «clásicos», Marte y Europa, se ha sumado recientemente, con fuerza, Encélado, y no habrá que perder de vista a Calisto, Ganímedes, Titán, Tritón y otros satélites y planetas enanos, de modo que las expectativas son apasionantes. Por otra parte, la existencia de agua en tantos lugares mejora las perspectivas de acceder a ella en la futura exploración del sistema solar.

Después de este inesperado «baño» en agua por todo el entorno del Sol, estamos más animados que nunca para asomarnos «allá fuera», al resto de la galaxia y del universo. ¿Qué sorpresas nos deparará?

El agua en el universo

Aunque parece haber agua por todos los rincones del universo, quizá eso no haya sido siempre así, pudiendo ser su distribución muy desigual. Es del máximo interés conocerla, y saber el estado en que se encuentra, para determinar los lugares en los que podría sostener el origen y la evolución de la vida.

FIG. 1



En a) se muestra la formación de helio a partir de hidrógeno mediante fusión nuclear. En b) se muestra una de las rutas que, mediante fusión nuclear, que conducen a la creación de oxígeno-16 a partir de helio-4. El número a la derecha de cada nombre de átomo indica la suma de protones (P) y neutrones (N) en el núcleo, principal determinante de la masa atómica.

1% de la masa). Las estrellas pudieron expulsar ese oxígeno mediante sus *vientos estelares*, pero fueron sobre todo las estrellas más masivas, al explotar como *supernovas*, las que sembraron el espacio interestelar de H, C, N, O, etc., dando ocasión a que el O pudiera combinarse con el H y formar H_2O .

Sin embargo, esas nubes moleculares aún tendrían muy poco O, y se pensaba que, por tanto, dispondrían de escasísima agua

para formar nuevas estrellas y planetas, ya de segunda generación. Se estimaba que habría que esperar al menos unos 1700 millones de años para que las sucesivas generaciones estelares tuvieran un contenido apreciable de agua.

No obstante, sorprendentemente, Shmuel Bialy, del Departamento de Astrofísica de la Escuela de Física y Astronomía de la Universidad de Tel Aviv, y sus colegas han llegado con sus modelos a la conclusión de que, al estar las nubes moleculares procedentes de la primera generación de supernovas —con menos de 1 000 millones de años— más calientes (a unos 27 °C) que las posteriores, a pesar de tener miles de veces menos oxígeno que nuestra galaxia, tendrían tanta agua como esta última. La razón es que el H_2O se formaría en esas condiciones con mucha mayor eficiencia, compensando la escasez de suministro de O. De haber sido efectivamente así, se plantea una inesperada habitabilidad de los primeros planetas, al menos en lo que se refiere al agua.

Pero habría un problema: la presencia de una fuerte radiación ultravioleta (UV) emitida por las propias estrellas jóvenes, que rompería los enlaces H-O. A medida que las estrellas de la primera generación se vieron sustituidas por las de la segunda, con mayor cantidad de material por estrella, la separación espacial entre los astros aumentó, y disminuyó el efecto lesivo de la radiación UV sobre las moléculas de agua.

A la hora de entender cómo se formó esta última, hay que considerar la dificultad de su síntesis libre en el espacio exterior, ya que las colisiones atómicas de tres átomos (dos H y un O) en un medio gaseoso a presiones muy bajas deben ser muy raras. La probabilidad aumenta con la agregación de materia, empezando por la que se produce en las nubes moleculares y los agregados de polvo y gas. El polvo representa solo el 1% de la materia del espacio interestelar, pero facilita mucho la formación de moléculas. N. Miyauchi y otros investigadores de la Universidad de Hokkaido, en Japón, han conseguido formar H_2O y H_2O_2 en condiciones similares a las de las nubes interestelares, a 10 kelvins (-263,15 °C), a partir de H atómico y O₂ congelado. En otros estudios se sugiere la formación de H_2O en el polvo por el bombardeo de protones (H⁺) sobre átomos de O de silicatos.

En la superficie del polvo se acumularían el agua y otros compuestos volátiles en estado congelado, que después irían a parar a cuerpos como los planetas. El universo primitivo estaba relativamente libre de polvo, pero este fue aumentando por los efectos gravitatorios; posteriormente, también se ha formado como producto de colisiones entre cuerpos de mayor tamaño.

Las estrellas son las alquimistas del universo.

PHILIP BALL, DIVULGADOR CIENTÍFICO BRITÁNICO

parte del agua del universo sigue adsorbida en las partículas de polvo interestelar. Probablemente se encuentra sobre todo, dadas las condiciones de formación y permanencia, en estado de hielo amorfo de alta densidad (HDA, por sus siglas en inglés). De hecho, parece que la mayor parte del agua universal se encuentra en la forma también conocida como hielo amorfo (o vítreo, del que hay asimismo una variante de baja densidad, LDA). En unos estados u otros, el H_2O puede ser la segunda molécula (en competencia con el monóxido de carbono, CO) más abundante del universo, a gran distancia de la líder (H_2).

A pesar de las predicciones teóricas, podía quedar alguna duda sobre el predominio del hielo frente al vapor de agua procedente de la sublimación del primero a las bajas presiones del espacio, sobre todo en zonas como las regiones frías de nuestra propia galaxia, que son las cunas de sistemas planetarios como el nuestro. Pues bien, una investigación de astrónomos italianos y españoles descubrió que el 99% del agua de las zonas frías de la Vía Láctea se halla en forma de hielo, y solo un 1% en fase gaseosa.

EN BUSCA DE AGUA LEJANA Y ANTIGUA

El agua en el espacio puede detectarse gracias a sus emisiones de radiación electromagnética (véase la tabla de la página contigua), debidas a transiciones entre los diversos estados de rotación y vibración de los átomos en sus moléculas. Pero hay dificultades

para su observación desde tierra debido a que abunda en la atmósfera. Por suerte, el agua en estado gaseoso puede emitir ondas de radio de una longitud característica, 1,35 cm, y con una gran intensidad —que permite detectarla— gracias a que se amplifican mediante un proceso conocido como *máser*, que es equivalente al láser pero en la región de las microondas. Esa emisión procedente

Líneas de H_2O observadas		
Frecuencia (GHz)	Longitud de onda	Telescopio
22,235	1,35 cm	En tierra
183,310	1,63 mm	En tierra
325,153	0,92 mm	En tierra
556,936	538,3 μ m	SWAS, ODIN, Herschel
1 669,905	179,5 μ m	ISO, Herschel
1 113,343	269,3 μ m	Herschel
987,927	303,5 μ m	Herschel
752,033	398,6 μ m	Herschel
1 097,365	273,2 μ m	Herschel
1 153,127	260,0 μ m	Herschel
1 661,008	180,5 μ m	ISO, Herschel
1 669,905	179,5 μ m	ISO, Herschel
1 716,770	174,6 μ m	ISO, Herschel
2 164,132	138,5 μ m	ISO, Herschel
2 196,346	136,5 μ m	ISO, Herschel
2 391,573	125,4 μ m	ISO, Herschel
2 640,474	113,5 μ m	ISO, Herschel
2 773,977	108,1 μ m	ISO, Herschel
3 331,458	90,0 μ m	ISO, Herschel
4 166,852	71,9 μ m	ISO, Herschel

Líneas destacadas en el espectro de emisión del agua. Las tres superiores se detectan desde tierra. El resto son detectadas desde radiotelescopios espaciales como los indicados.

del espacio puede ser captada por los radiotelescopios instalados en el suelo. Así se ha encontrado vapor de agua hasta en un centenar de galaxias, que por la gran luminosidad de su emisión máser son conocidas como *galaxias megamáser*. Los megamáseres son extraordinariamente brillantes, alrededor de 100 millones de veces más brillantes que los máseres encontrados en la Vía Láctea.

No obstante, como esta emisión se produce solo desde zonas extremadamente densas y calientes, la información que con ella podemos obtener acerca de cómo está distribuida el agua en el universo es muy incompleta.

Utilizando otras líneas de emisión, en julio de 2011 dos equipos de astrónomos dirigidos por científicos del Instituto de Tecnología de California (Caltech) consiguieron la detección espectroscópica desde tierra de lo que hasta el momento es la mayor acumulación de agua conocida en el universo. Se trata del vapor de agua que rodea a un quásar (uno de los objetos más luminosos del universo), el APM 08279 + 5255, una galaxia situada a 12 000 millones de años-luz de nosotros, de modo que lo que se observa es una situación de cuando el universo solo tenía 1 800 millones de años. En total, la masa de agua detectada equivale a 140 billones de veces la de la suma de todos los océanos terrestres. Matt Bradford, director de uno de los dos grupos de investigación, afirma que es otra prueba de que «el agua es persistente a lo largo de todo el universo, incluso en su etapa más joven».

Otro instrumento recientemente muy bien preparado para la detección desde tierra de agua más allá de la Vía Láctea es el ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), del Observatorio Europeo Austral, un conjunto de radiotelescopios situado en el desierto de Atacama, en Chile, a unos 5 000 m de altitud, con lo que se evita mucha contaminación atmosférica y lumínica (véanse las págs. 130-131). Desde finales de 2016 puede detectar ondas de radio con longitudes de onda de 1,4 a 1,8 mm, lo que le permite captar señales débiles de agua en esa región del espectro. ALMA ha encontrado moléculas de agua en una galaxia a 12 000 millones de años-luz.

Sin embargo, nos interesa más aquella que acaba formando parte de estrellas y sus sistemas planetarios, por la posibilidad

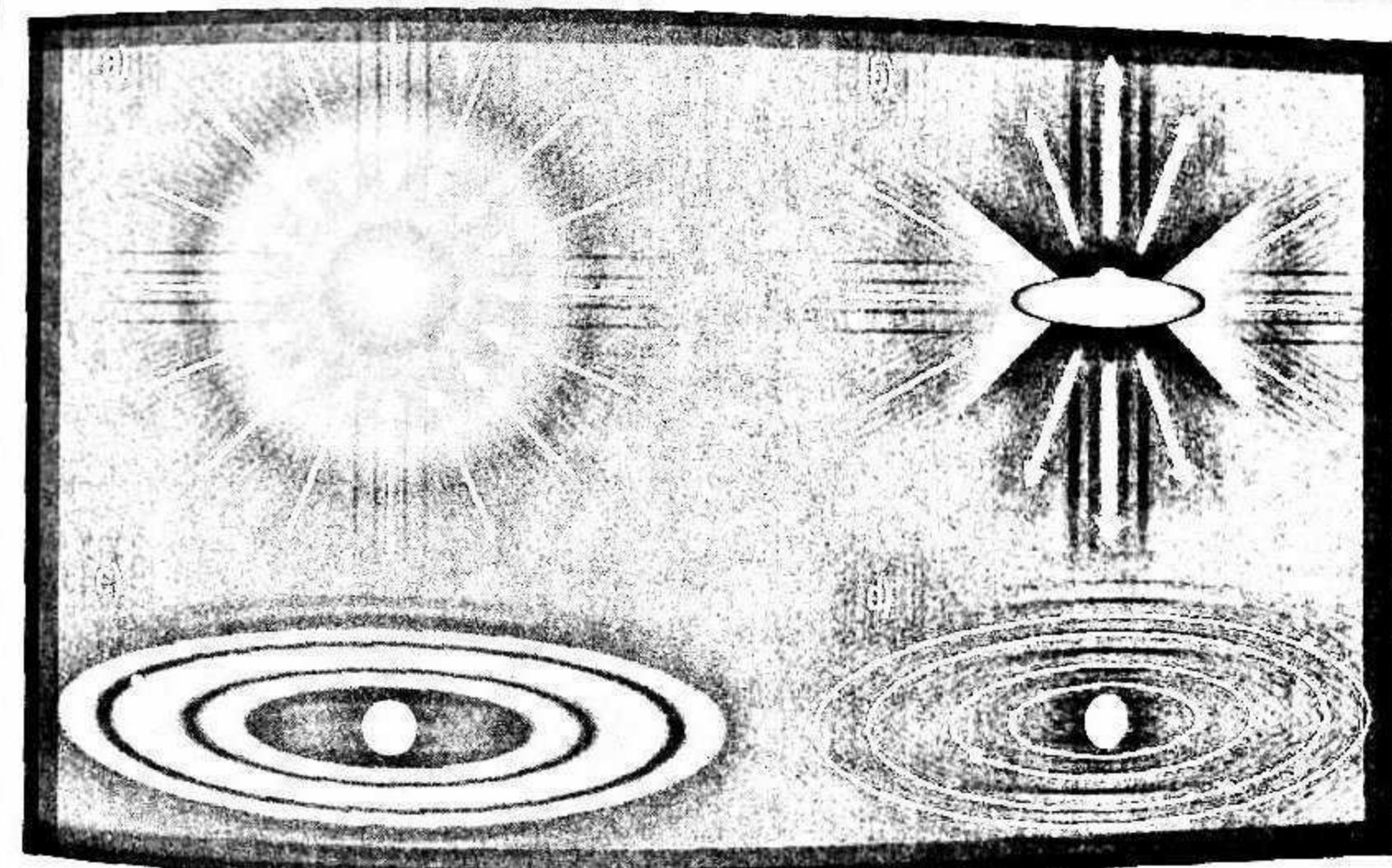
de que sirva en estos como «matriz de la vida», estando a nuestro alcance observador solo las emisiones producidas desde nuestra propia galaxia.

El agua en la formación de las estrellas

Se sabe que los sistemas planetarios se forman a partir de extensas nubes de polvo y gas. Al principio, esas nubes son muy tenues, con moléculas muy dispersas, pero con el tiempo se van compactando y originan agregados de materia que acaban colapsando por efecto de la gravedad hasta formar protoestrellas y luego estrellas (figura 2). El inicio de las reacciones de fusión nuclear marca el paso de protoestrella a estrella.

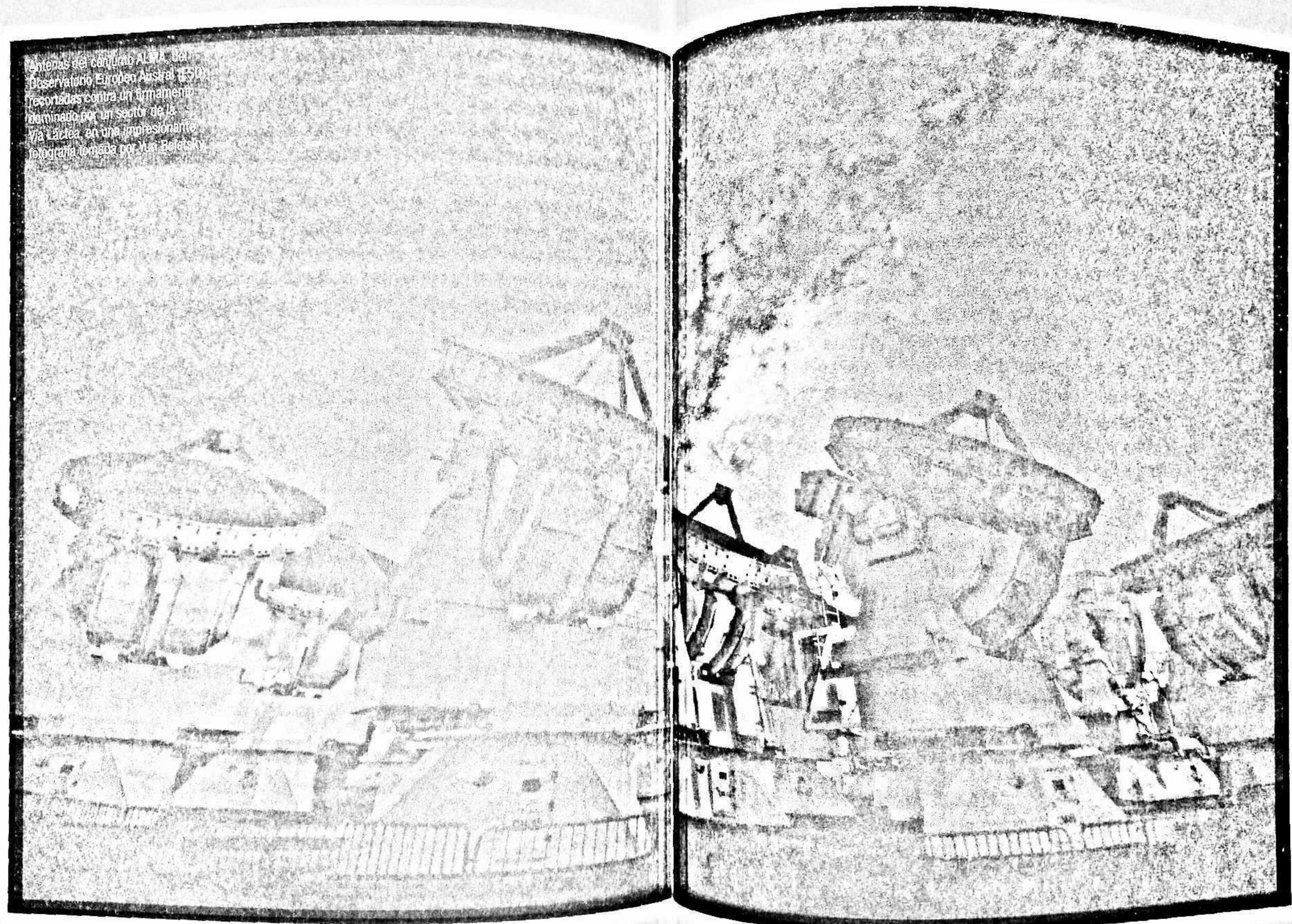
En 1969 un grupo de astrónomos dirigidos por Charles Townes detectó por vez primera, desde tierra, las emisiones máser del agua

FIG. 2



Formación de un sistema planetario. En a) se muestra el colapso de la nube protoplanetaria. En b), la protoestrella con su disco y sus chorros bipolares. En c), la estrella y los planetas en formación, con sus anillos protoplanetarios. En d), la estrella y el sistema planetario plenamente formados.

Antenas del conjunto ALMA, del Observatorio Europeo Austral (ESO), fotografiadas contra un firmamento dominado por un sector de la Vía Láctea, en una impresionante fotografía tomada por Yann Belotsky.



en tres nubes de formación de nuevas estrellas. Pero como para estudiar otras líneas espectrales se necesitan telescopios espaciales, se han lanzado varios en los últimos años, entre los que destaca el observatorio Herschel de la ESA, que funcionó entre 2009 y 2013.

Se sabe que las protoestrellas de baja masa lanzan *chorros bipolares* (o *jets*) de material, así llamados porque salen eyectados por las dos regiones polares de la futura estrella (véase la sección b) de la figura 2). Esos chorros chocan a gran velocidad y altas temperaturas con el gas y polvo circundantes, y se pensaba que de un modo destructivo para las moléculas.

Sin embargo, se ha comprobado que esos choques pueden favorecer la creación de nuevas moléculas. Las líneas espectrales del agua en el infrarrojo lejano ya fueron detectadas en 1996 en la protoestrella HH54B por el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO) de la ESA, y más recientemente por el Herschel (con su instrumento de detección de infrarrojos HIFI). Mediante este último, un equipo liderado por Lars Kristensen, astrónomo de la universidad holandesa de Leiden, pudo estudiar en 2011 a L1448-MM, una estrella de tipo solar en proceso de formación situada en la constelación de Perseo, a 750 años-luz de la Tierra. L1448-MM está en la fase de colapso gravitatorio de creación de un disco protoplanetario (del que surgirán sus planetas). Observaron que L1448-MM está desprendiendo muchísimo material, sobre todo hidrógeno y helio, a través de dos gigantescos chorros bipolares. Más tarde, parte de este hidrógeno se une a átomos de oxígeno, formando agua. Según Kristensen, los chorros viajan a hasta 300 km/s, y cuando impactan contra los gases del medio interestelar que hay alrededor de la protoestrella, se generan unas ondas de choque que estimulan la formación de nuevas moléculas, entre ellas las de agua.

Las ondas de choque son de dos tipos, según su violencia. En las de tipo C, la temperatura no sobrepasa los 3000 K (unos 2727 °C), con lo que no destruye la mayor parte de las moléculas, e incluso favorece la formación de agua. En las ondas de tipo J se alcanzan los 100 000 K, lo que causa la rotura de todas las moléculas, pero en las regiones posteriores a las ondas apenas se alcanzan 10 K (unos -263 °C), y se generan una especie de

«bolsillos» con temperaturas en torno a los 250 K (unos -23 °C) que están protegidos de la radiación ultravioleta: unas condiciones que favorecen la formación de moléculas de agua.

Como vemos, no se puede decir que «la protoestrella dispara

gigantescos chorros de agua al espacio», como titularon muchos medios,

pues esta no está presente en los

chorros. Para hacernos una idea más

ajustada, tengamos en cuenta que la

cantidad de moléculas de agua en las

ondas de choque puede ser entre una

diezmilésima y una cienmilésima parte de la cantidad de mo-

léculas de hidrógeno. Hay que añadir que también hay agua en

el medio alrededor de las protoestrellas, aunque su proporción

respecto al hidrógeno es muy inferior a la que hay en las ondas

de choque, entre una millonésima y una diezmillonésima.

Poco después de los hallazgos de Kristensen, la astrónoma italiana Paola Caselli, de la Universidad de Leeds en Inglaterra, detectó, también gracias al Herschel, una enorme cantidad de vapor de agua en una nube molecular, L1544, a unos 450 años-luz de la Tierra en la constelación de Tauro, que se halla en el comienzo de la formación de una estrella. Estimó que la cantidad de agua detectada equivale a 2000 veces la de todos los océanos terrestres. Según Caselli, ahora habrá que revisar la hipótesis según la cual toda el agua se congela en los granos de polvo porque el universo es demasiado frío para permitir la fase gaseosa del agua. Aunque precisó que «para producir esa cantidad de vapor debe haber una gran cantidad de hielo de agua en la nube», más de tres millones de océanos como los de la Tierra, y que habrá que estudiar la importancia de los rayos cósmicos para mantener una cierta proporción de vapor de agua.

También se observó que las moléculas de agua están fluyendo hacia el corazón de la nube en la que se formará, con toda probabilidad, una nueva estrella, y tal vez un sistema planetario como el solar. Parte del vapor entrará en la formación de la estrella, pero el resto se incorporará al disco circundante y, finalmente, a los eventuales nuevos planetas.

Hay mucha agua sin vida en el universo, pero en ninguna parte hay vida sin agua.

Sylvia A. Earle, oceanógrafa estadounidense

Michiel Hogerheijde, investigador de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, dirigió un estudio en el que, utilizando el instrumento HIFI del Herschel, se detectaron grandes cantidades de vapor de agua fría alrededor del disco de polvo y gas que envuelve a TW Hydrae, una estrella joven que parece en la etapa final de su formación. Es una enorme reserva de hielo, con la que se podrían llenar miles de veces los océanos de la Tierra. Tras estos y otros hallazgos (en los que también se ha utilizado el telescopio espacial Spitzer de la NASA), los científicos creen que los planetas tan cubiertos de agua como la Tierra, o más, pueden ser muy comunes en el universo.

Hay varios estudios en los que se ha seguido la presencia de agua en las diversas fases de la evolución estelar, y se ha encontrado que ni siquiera en la «agonía» de las estrellas (cuando la intensa radiación estelar destroza las moléculas) se destruye toda el agua. Un equipo de astrónomos españoles y mexicanos liderado por Luis F. Miranda, del Instituto de Astrofísica de Andalucía, encontró agua (gracias a su emisión máser) en una estrella moribunda en la nebulosa planetaria K3-35, que se halla a 16 000 años-luz de nosotros, en la constelación de Vulpecula. Cuando una estrella de tipo solar agota su combustible, se expande, aumentando su tamaño cientos de veces, y se convierte en una gigante roja (algo que le ocurrirá al Sol en unos 5 000 millones de años). Luego, la estrella comienza a contraerse y calentarse, y su intensa radiación ioniza (arrancando electrones a los átomos) el gas que fue expulsado por la estrella en la etapa anterior de gigante roja, y se supone que así se destruyen el agua y otras moléculas. Por eso, la detección de agua en K3-35 ha sido una gran sorpresa. ¿La razón? Puede ser simplemente que K3-35 sea una nebulosa planetaria tan joven que no ha tenido tiempo de destruir las moléculas de agua a su alrededor.

Queda mucho que aprender sobre el recorrido y los estados del agua hasta que aparece en las atmósferas planetarias. Recorremos, por otra parte, que en estos procesos el deuterio puede experimentar algunos enriquecimientos o empobrecimientos respecto al hidrógeno.

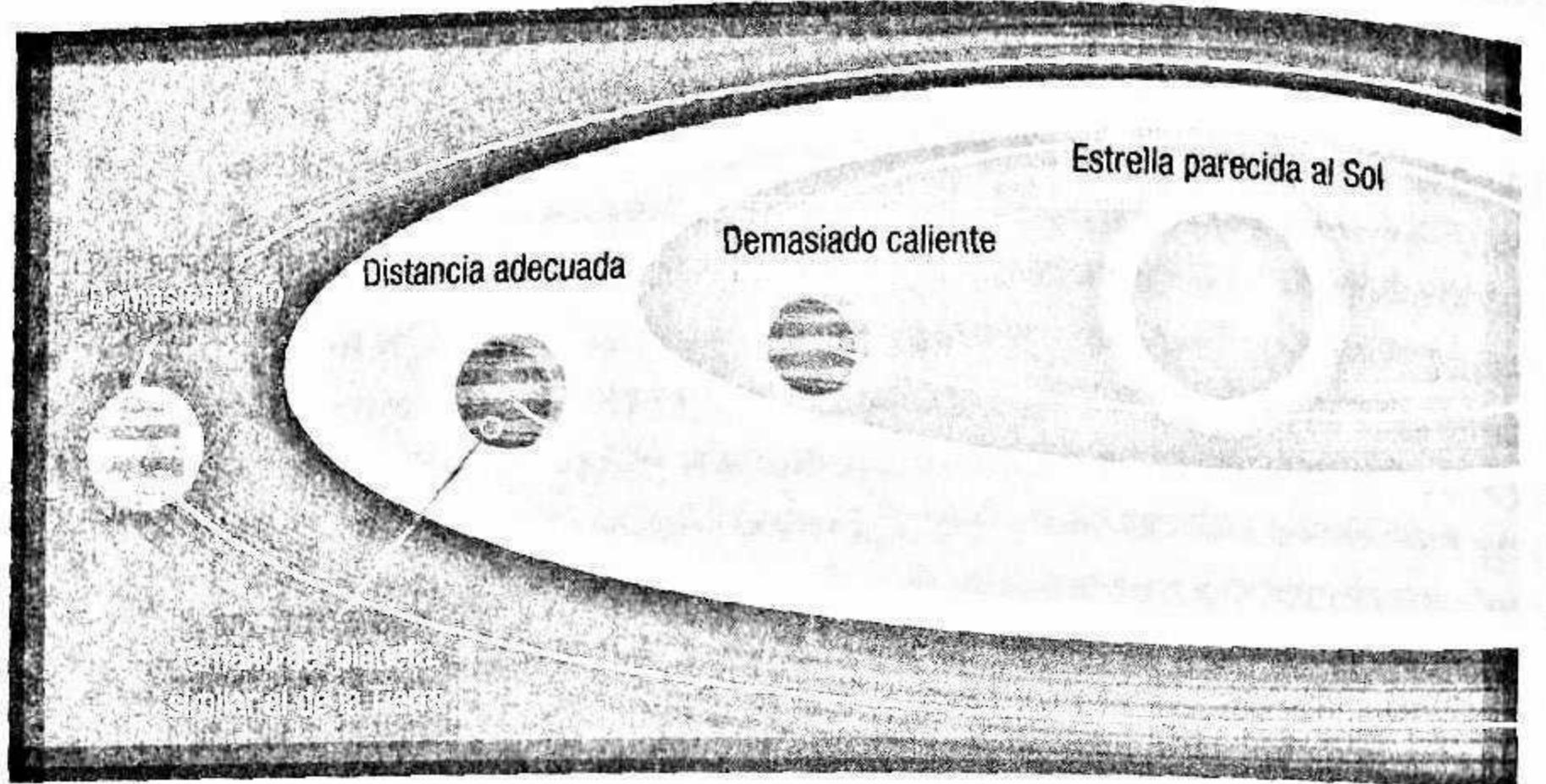
Hemos hablado de la formación de estrellas (y sus sistemas planetarios) y de la muerte estelar. Vayamos ya a la etapa intermedia, la que más puede interesar para el desarrollo de la vida; la fase, más o menos larga, en la que los sistemas planetarios ya formados se mantienen estables en lo que a sus estrellas se refiere. Dentro de ellos, ¿dónde podemos encontrar agua líquida, y durante cuánto tiempo? No obstante, debe aclararse que, si bien la vida que conocemos exige agua líquida (de ahí lo de «matriz de la vida»), no sabemos con qué probabilidad el agua líquida la favorece, de modo que no hay que despertar excesivas expectativas con cada hallazgo que se produzca.

Se define la zona de habitabilidad o *zona habitable* (ZH) de una estrella como la región a su alrededor en la que las condiciones permiten la existencia de agua líquida abundante y permanente (durante al menos cientos de millones de años) sobre la superficie de un planeta similar a la Tierra.

Se suele aceptar que esta zona (figura 3) es un anillo más o menos amplio. En la región interior más allá del anillo habría un exceso de efecto invernadero, que origina un calentamiento excesivo (como ocurre en Venus), y en la exterior una desaparición del agua líquida por congelación (como en Marte). Por eso a la ZH se la conoce también como zona «Ricitos de oro», aludiendo a la niña protagonista de un cuento, que se encuentra con las sopas de tres osos y elige la que no está ni demasiado fría ni demasiado caliente.

Los valores más aceptados hoy como límites de la ZH para planetas de tipo terrestre son los que propusieron y argumentaron el geólogo estadounidense James Kasting y sus colaboradores en 2013. Para el sistema solar la ZH está a entre 0,99 y 1,7 UA de nuestra estrella, de modo que la Tierra, a 1 UA del Sol, está dentro de ella por muy poco, y se sitúa en el borde del sobrecalentamiento. Venus, a solo 0,72 UA del Sol, ahora queda fuera, pero Marte, a 1,52 UA, dentro (no importa que esté o no habitado). Existe además un caso de sistema planetario con aún más planetas habitables en torno a su estrella, de modo que tal vez no sean

FIG. 3



Zona habitable alrededor de una estrella en un sistema planetario. En el escenario más idóneo para la vida, la estrella será de tipo F, G, K o M, y el planeta en la zona habitable, de tamaño no muy distinto del de la Tierra.

raros. Es interesante hacer notar que esta vecindad de planetas habitables eleva las posibilidades de *panspermia* (tránsito de seres vivos) entre ellos.

En todo caso, hay que tener cuidado, porque las definiciones convencionales de zonas habitables suelen ignorar otras maneras de conseguir agua líquida y habitabilidad, que no dependen directamente de la iluminación estelar. Y hay parámetros, como la velocidad de rotación, la inclinación del eje, la composición y nubosidad atmosférica, etc., que pueden ser decisivos. De especial importancia es la masa del planeta; recordemos el caso de Marte para tener presente la necesidad de un tamaño planetario mínimo que pueda retener gravitatoriamente a la propia capa de aire y que permita mantener una actividad en el núcleo que genere una magnetosfera protectora de la atmósfera (e, indirectamente, de la hidrosfera) y que sostenga una tectónica de placas.

En todo caso, las zonas habitables estándares no son estáticas, sino que se van alejando de la estrella —a la vez que se ha-

cen más extensas— conforme esta aumenta su luminosidad en el curso de su evolución. Por esta razón, la Tierra puede quedar fuera de la ZH del Sol en unos cientos de millones de años (unos 1750 millones de años, según algunos autores).

De las lunas de gigantes a más allá de las estrellas

Como al considerar las zonas habitables el requisito es la presencia de agua líquida, también debemos considerar, para empezar, los interiores de los planetas gigantes, como los del sistema solar exterior, y sus lunas capaces de mantener océanos subsuperficiales gracias al calentamiento mareal y radiogénico.

No obstante, no debe ignorarse que la vida requiere algo más que agua líquida. Se necesita una fuente adecuada de energía y, probablemente, superficies rocosas en contacto con esa agua, lo que deja fuera a los planetas tipo Júpiter. En cambio, si que serían propicios para la vida ambientes similares a los que encontramos en el entorno de las surgencias hidrotermales submarinas de la Tierra, y que en el sistema solar también pueden existir, como hemos visto, en los océanos internos de Encélado, Europa y tal vez otros satélites de planetas gigantes. Como esos océanos dependen de las inmensas fuerzas de marea de los grandes planetas (aunque también pueda ser importante el calor residual de la formación del cuerpo y la radiactividad), cabría hablar incluso de *zonas habitables mareales* alrededor de los gigantes gaseosos. Tales zonas aparecen a cualquier distancia de la estrella, fuera de la ZH estándar.

En el sistema solar, los planetas gigantes, gaseosos o helados están muy alejados del Sol, pero se sabe de numerosos sistemas planetarios en los que los grandes planetas están mucho más próximos a su estrella. Habrá que hacer, en esos casos, los estudios pertinentes sobre la presencia de agua líquida y la habitabilidad en sus satélites, notablemente calentados de forma directa, en esos casos, por la estrella.

Finalmente, no olvidemos la posibilidad de planetas o satélites con otros medios líquidos, como ocurre en Titán. Se habla,

por ejemplo, de una «zona de habitabilidad del metano», que se localizaría mucho más alejada de la estrella que la correspondiente al agua.

Existen otras maneras por las que puede haber agua líquida —y tal vez vida— fuera de las zonas habitables estándar. Se ha argumentado que los planetas que retengan H_2 —un potente gas de efecto invernadero— en su atmósfera gracias a su gran tamaño y a la lejanía del viento estelar, podrían tener agua líquida superficial y ser habitables mucho más allá de la ZH. Incluso podrían serlo los planetas «salvajes» o errantes, que han escapado de su sistema planetario y vagan libres por el espacio sin girar en torno a estrella alguna. La abundancia de este tipo de planetas se desconoce, pero puede ser considerable. Lástima que sean de tan difícil detección.

Teniendo en cuenta todas las posibilidades, hasta es posible que la mayor parte de los mundos potencialmente habitables estén fuera de las ZH estándar. Pero no cabe duda de que nuestra capacidad de detectar vida en ellos es mucho menor, y es probable que las limitaciones energéticas y otras condiciones no sean idóneas para la evolución de las formas más complejas de seres vivos.

Por todo lo dicho, en un análisis de la habitabilidad planetaria conviene atender sobre todo a la diversidad de cuerpos (no solo planetas) que nos podemos encontrar con abundancia de agua líquida.

La clasificación de los mundos según Lammer

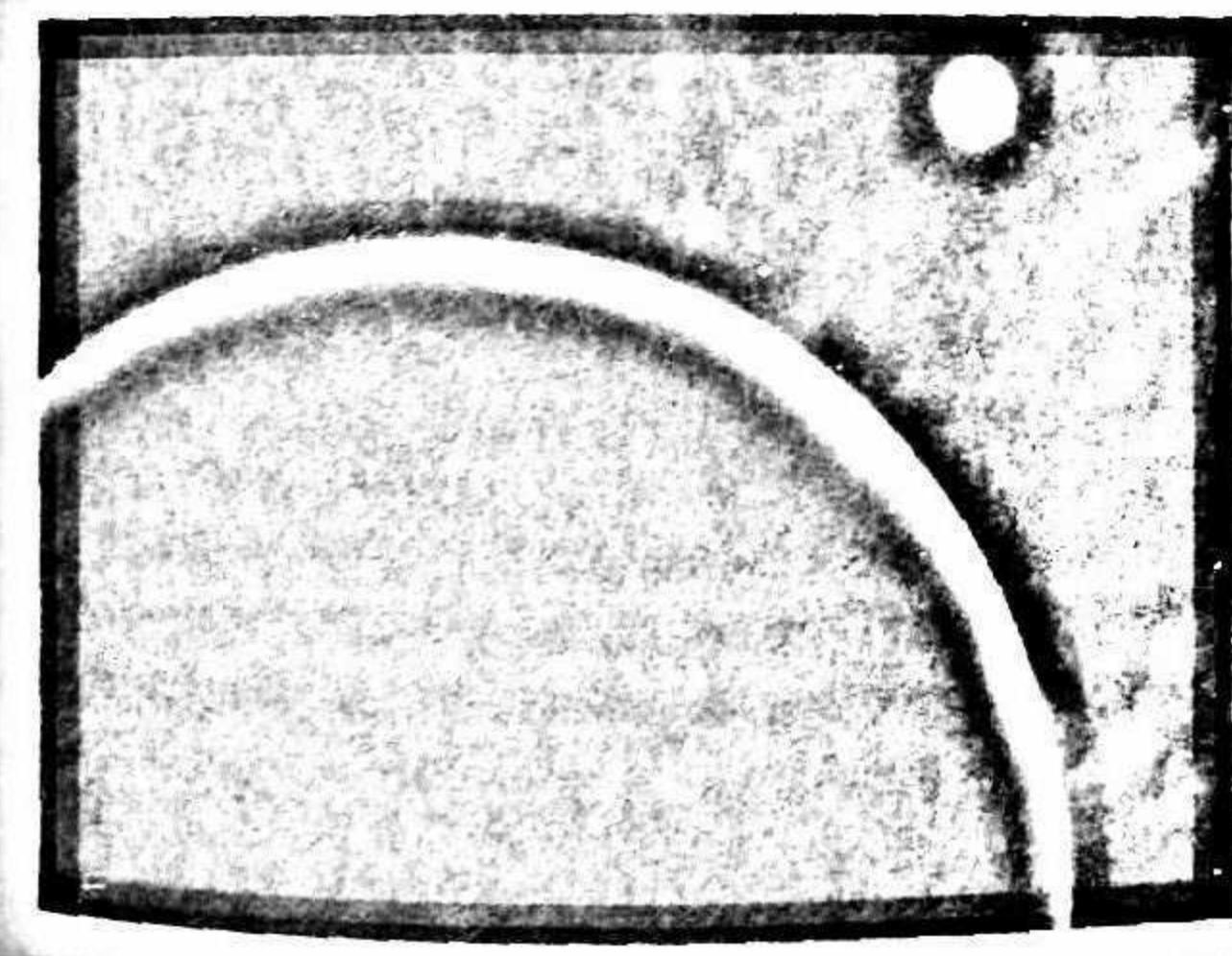
Se han propuesto diversas clasificaciones de los cuerpos celestes en función de su habitabilidad, pero la más interesante aquí, por el modo en que tiene en cuenta el agua, quizás sea la que realizó en 2009 el astrónomo austriaco Helmut Lammer, con aportaciones, en 2013, del planetólogo francés François Forget. Inicialmente se distinguían cuatro clases de hábitats (o cuerpos con esos hábitats), pero en 2013 Lammer y colaboradores añadieron una quinta:

MUNDOS SUPERHABITABLES

Averiguar que la Tierra es un planeta habitable por muy poco, de modo que en un futuro no tan lejano dejará de serlo, llevó en 2014 a los astrofísicos René Heller y John Armstrong a pensar en mundos *superhabitables*, mejor ubicados en la zona habitable, pero también a poner en cuestión el concepto estándar de esta zona y a buscar las mejores características, *a priori*, para desarrollar vida, y en especial la vida más compleja. Siempre con el supuesto básico de que esta necesita agua líquida. En su concienzudo estudio, los autores ilustraron cómo la acción de las mareas puede hacer que planetas dentro de la ZH sean inhabitables y, en cambio, que si lo sean satélites más allá de la ZH. Para un planeta rocoso, el mero hecho de tener una masa dos o tres veces superior a la Tierra lo haría más habitable debido a la mayor actividad tectónica, un ciclo de carbonato y silicato activo durante más tiempo, un mejor blindaje magnético contra los rayos cósmicos y la radiación estelar de alta energía, una superficie mayor y más lisa, que permite mares más someros, y un mejor potencial para retener atmósferas más gruesas que la de la Tierra.

Factores esenciales

Otro aspecto importante es la naturaleza de la estrella, que debe tener una longevidad suficiente para dar tiempo al desarrollo de la vida (sobre todo la más compleja). Por esa razón, resulta mejor si es más pequeña que el Sol, lo que supone una mayor cercanía de la ZH a la estrella —aunque, si está demasiado próxima, puede provocarse un indeseable acoplamiento de marea—. Los autores acaban decantándose por las estrellas de tipo K, más abundantes que las G. Además, puede convenir que la órbita planetaria no sea demasiado excéntrica, aunque no hace falta una muy circular para mantener la superhabitabilidad. Heller y Armstrong concluyen que los mundos superhabitables pueden ser más abundantes que las «tierras» y piden que se tengan en cuenta sus consideraciones en la búsqueda de exoplanetas con vida.



Las estrellas de tipo K figuran entre las más idóneas para tener a su alrededor algún planeta con vida. La imagen es una recreación artística de una de tales estrellas, vista desde las inmediaciones de uno de sus planetas, Kepler-421b, investigado por el equipo de David Kipping, astrónomo del Centro para la Astrofísica (CfA), gestionado conjuntamente por la Universidad Harvard y el Instituto Smithsonian, de Estados Unidos.

Clase I: cuerpos con océanos superficiales muy perdurables, que no los cubren por completo (condiciones similares a las de la Tierra).

Clase II: cuerpos como los de la clase I, pero que no se conservan un largo tiempo.

Clase III: cuerpos con uno o varios océanos subterráneos en contacto con una capa inferior de silicato.

Clase IV: cuerpos con uno o varios océanos situados por encima de una capa de hielo.

Clase V: *mundos océano*, totalmente cubiertos de agua, que alcanza mucha más profundidad que en los cuerpos de clase I.

En los hábitats de clase I las condiciones deben permitir la presencia de agua líquida permanente en la superficie, pero sin cubrirla totalmente. De momento, el único cuerpo del que hay constancia de que satisface esos criterios es la Tierra. Pueden originarse formas de vida pluricelulares complejas.

Los hábitats de clase II incluyen cuerpos en los que puede evolucionar la vida, pero las condiciones estelares y geofísicas no permiten mantener el agua líquida superficial un tiempo suficiente para que puedan desarrollarse los organismos más complejos (eucariotas, y sobre todo pluricelulares). Los planetas de esta clase evolucionan hacia mundos de tipo Venus o Marte (que por tanto son de clase II).

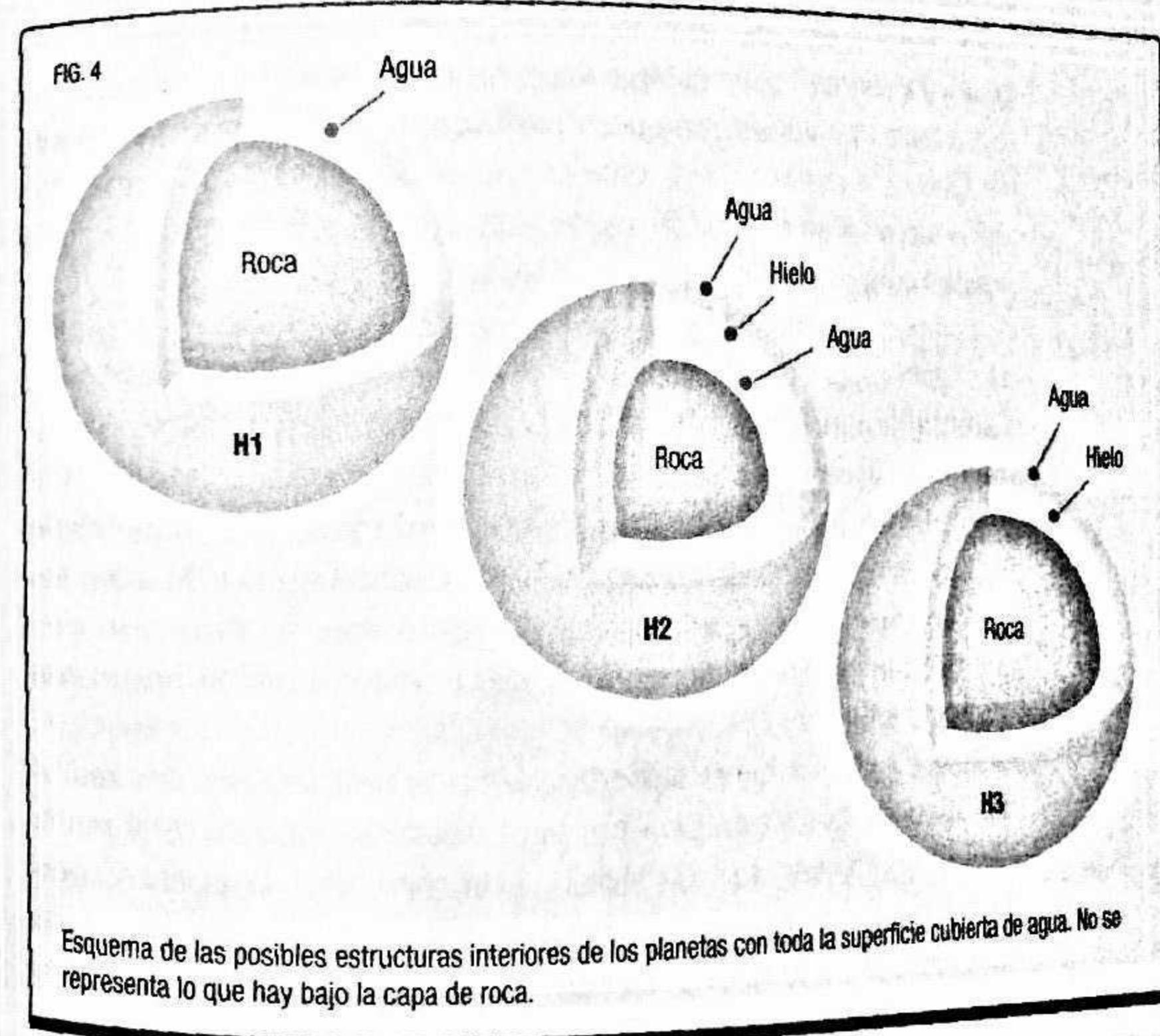
Los hábitats de clase III se dan en cuerpos donde existen océanos de agua subterránea que interactúan directamente con un núcleo rico en silicato. Es posible que existan fuentes hidrotermales subacuáticas, con el potencial biológico consiguiente. La luna de Júpiter Europa, y Encélado, de Saturno, parecen pertenecer a esta clase.

En los hábitats de clase IV hay capas de agua líquida entre dos capas de hielo, o bien líquido superficial, pero sobre hielo,

no sobre roca. Estos mundos son menos interesantes para la vida al no existir los flujos de energía y materia necesarios. En el sistema solar los casos mejor estudiados de probables cuerpos de esta clase son los de los satélites Ganímedes, Calisto y Titán.

Los mundos océano, o de clase V, se espera —por su capacidad de retención gravitatoria— que sean sobre todo *supertierras* (con de 5 a 10 masas terrestres o de 1,5 a 2,5 radios terrestres). Teniendo en cuenta que las supertierras abundan entre los exoplanetas descubiertos hasta la fecha, los mundos océano podrían ser muy comunes en la Vía Láctea y en el universo.

Como los de clase III y IV, los mundos de clase V no es necesario que estén en la zona habitable estándar de su estrella, aunque podrían ser habitables. Hay tres subclases de la clase V (figura 4). En los cuerpos de la subclase H1, el fondo del océano



está en contacto con el interior rocoso. Los H3 tienen una capa interna de hielo denso (no el cotidiano Ih, sino el VI o el VII, que existen incluso a altas temperaturas) bajo el océano, y los H2 tienen un segundo océano bajo la capa de hielo denso debido al calor interno del planeta. Solo se vislumbran posibilidades aceptables de vida en los H1 y los H2, gracias al contacto del agua líquida con la roca, pero en los H2 las condiciones quizás sean demasiado extremas (si bien todavía desconocemos los límites de presión para la vida). La habitabilidad de los mundos océano es difícil de evaluar, pero puede que sea clave la posibilidad de vulcanismo y tectónica de placas; en un mundo sin actividad geológica (y sin los necesarios desequilibrios energéticos) una gran disponibilidad de agua líquida puede no servir de nada en lo que a la aparición de vida se refiere. Debemos añadir que parece poco probable el desarrollo de una tecnología como la humana, dependiente del fuego, en cualquier mundo océano.

Finalmente, para Lammer, los mejores candidatos para el origen y la evolución de la vida son los mundos de clase I o III con un océano no excesivamente profundo, que también favorecen, mediante la existencia de vulcanismo a largo plazo, la disponibilidad de desequilibrios térmicos o químicos y, por tanto, la vida en el fondo oceánico.

LA HOSPITALIDAD DE LAS ESTRELLAS PARA EL AGUA

Volvamos a las zonas habitables convencionales, aunque dejen de lado la habitabilidad de los satélites similares a Europa o Encélado. Nos interesa, además de su extensión, su duración y estabilidad, y todo ello depende particularmente de la naturaleza de la estrella.

Unos tipos estelares son más idóneos que otros para mantener durante largo tiempo agua líquida en su superficie, y puede que alguna forma de vida similar a la terrestre. Una característica esencial de cualquier estrella es su luminosidad, que tiene que ver con su temperatura superficial. Esta guarda relación, a su vez, con la masa, y se refleja en el espectro de la estrella (una

especie de «código de barras» que nos dice cómo absorbe las distintas frecuencias de la radiación), que determina su color (véase la tabla).

Por esta razón ha tenido tanto éxito la llamada *clasificación espectral de Harvard*, que se estableció en esta universidad entre finales del siglo XIX y principios del XX. En ella, los principales tipos de estrellas se identifican (yendo de las más luminosas, masivas y calientes a las menos, y por razones históricas) con las siguientes letras mayúsculas: OBAFGKM RNS. Hay una regla mnemotécnica en inglés, de discutida corrección, para recordarlas: *Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now Sweetly* («Oh, sé una buena chica, bésame ahora mismo dulcemente»). A su vez, cada tipo espectral se divide en subtipos del 0 al 9, de modo que, por ejemplo, las M0 (o «M tempranas») se parecen a las K9 (o «K tardías») y las G9 a las K0. El Sol es una G2.

Los distintos tipos estelares difieren mucho en su capacidad para mantener agua líquida superficial en los cuerpos de su entorno. Las estrellas de mayor tamaño (O, B, A y F tempranas) son

Clase	%	Temperatura (K)	Color convencional	Masa	Radio	Luminosidad	Vida media (Ma)	Ejemplo
O	0,01	2800-50000	Azul	60	15	>140 000	1	48 Orionis
B	0,1	9600-28000	Blanco azulado	18	7	20000	100	Rigel
A	1	7100-9600	Blanco	3,1	2,1	80	1000	Sirio A
F	2	5700-7100	Blanco amarillento	1,7	1,3	6	4000	Canopus
G	7	4600-5700	Amarillo	1,1	1,1	1,2	15000	Sol
K	15	3200-4600	Amarillo anaranjado	0,8	0,9	0,4	30000	Arturo
M	75	1700-3200	Rojo	0,3	0,4	0,04	200000	Antares

Clasificación estelar según el tipo espectral. Las magnitudes masa, radio y luminosidad se establecen con respecto al Sol (Sol = 1). En todos los casos se ofrecen valores típicos.

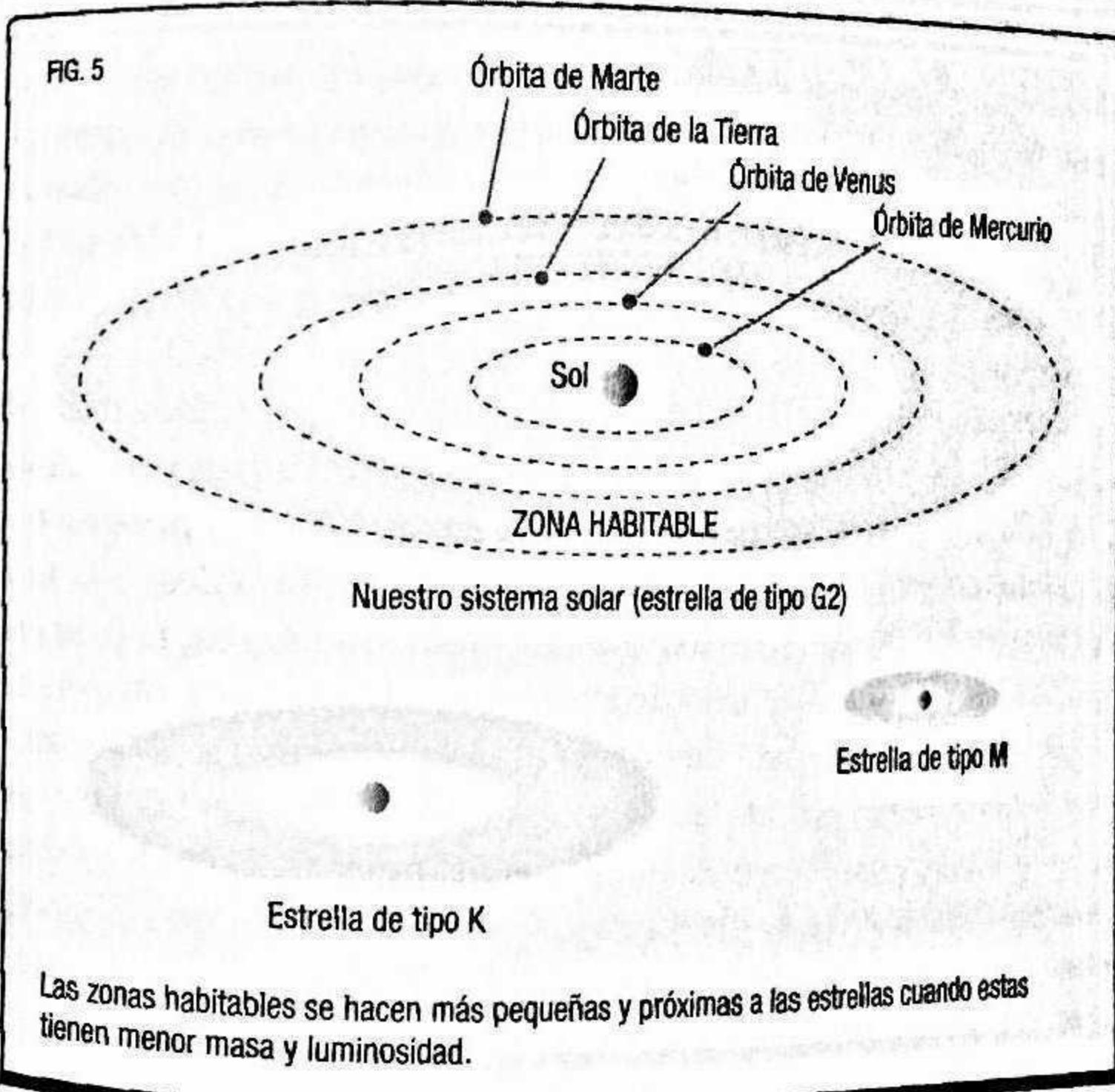
demasiado energéticas y poco longevas. Las estrellas F tardías (de F4 en adelante), G y K parecen las más adecuadas para albergar agua, y vida, debido a su estabilidad, amplitud de la ZH y duración. Las G, que suponen el 7% del total, son las que requieren menos explicaciones, ya que el Sol es una de ellas, de modo que podríamos considerarlas, de entrada, las más favorables para la vida. Sin embargo, hay un problema con más o menos la mitad, y es que surgieron antes de que la proporción de elementos de alto peso atómico en las nubes de gas y polvo fuera suficiente para formar planetas de tamaño terrestre con compuestos de interés probiótico. Por otro lado, más de la cuarta parte son más jóvenes que el Sol, por lo que en sus planetas ha habido menos tiempo para que tenga lugar una evolución como la nuestra.

Según vamos de las estrellas F a las K (pasando por las G), disminuye la radiación ultravioleta estelar y, por tanto, la necesidad de protección atmosférica para una vida expuesta, superficial. Esta es una de las razones por las que muchos consideran a las estrellas de tipo K (enanas naranjas, que suponen el 15% del total) como las más acogedoras para la vida. En torno a ellas se hallarían la mayoría de los planetas superhabitables. Hay que tener presente que si la luminosidad de una estrella K es, pongamos por caso, la cuarta parte de la del Sol, un planeta a su alrededor tendrá que estar en la mitad de la separación que hay entre la Tierra y el Sol para recibir la misma energía, pues esta decae con el cuadrado de la distancia. Considerando diversos factores, el astrónomo estadounidense Geoffrey Marcy y otros han calculado que el 22% de las estrellas tipo Sol (GK en su estudio) pueden tener planetas similares a la Tierra en sus zonas habitables. Y como estiman en 40 000 millones los «soles» en la Vía Láctea, habría en ella unos 8 800 millones de «tierras habitables» (en el universo, cientos de billones), muchas de ellas más antiguas que la Tierra.

Las estrellas de tipo M, entre las que se encuentran las enanas rojas, son las más abundantes con diferencia: el 75% del total. Por su larguísima vida, disponen de muchos miles de millones de años con agua líquida para la aparición y evolución de la vida. Pero, al ser tan pequeñas, son poco luminosas, y los planetas habitables tendrán que estar mucho más cerca. Por ejemplo, si

la luminosidad de la estrella es 400 veces inferior a la del Sol, un planeta tendrá que localizarse veinte veces más cerca de su estrella de lo que está la Tierra del Sol (figura 5).

Un posible problema para la vida con las estrellas M, y las K tardías, es que son enormemente activas durante sus primeros miles de millones de años, en los que generan violentas emisiones de radiación, incluida la UV. En esas condiciones, los planetas perderían casi toda su atmósfera, aunque la vida submarina podría permanecer a salvo. Otra dificultad es que, al estar los planetas de la zona habitable tan cerca de su estrella, el efecto gravitatorio hace que se frene la rotación y acaben por mostrarle siempre la misma cara (un *acoplamiento de marea*, como el que tiene la Luna con la Tierra). Esa cara estaría siempre iluminada y tal vez demasiado caliente, y la otra, oscura y demasiado fría. En algunos casos podría estar casi todo el planeta helado (y, por tanto, blanco), salvo la zona más irradiada, generando lo que se



llama una *tierra-ojo*, por su parecido con un globo ocular. Quizá habría solo una estrecha franja habitable entre ambas zonas; sin embargo, algunos modelos de ordenador muestran que la circulación atmosférica ayuda, a modo de sistema de aire acondicionado, a aliviar el contraste y mejorar la habitabilidad.

Dado que las estrellas M nacidas en los primeros miles de millones de años del universo seguirán hoy (salvo cataclismos) su curso, y dada su gran abundancia, podrían mantener las formas de vida más extendidas y antiguas del universo. Un estudio liderado por el astrónomo sueco Erik Zackrisson estima que en el universo observable hay aproximadamente $7 \cdot 10^{20}$ (700 trillones) de «tierras» (con de 0,5 a 5 masas terrestres o de 0,8 a 1,5 radios terrestres) y supertierras, de las que el 98% estaría en torno a estrellas M y «solo» unos 20 trillones alrededor de otras más parecidas al Sol (FGK). Pero las estrellas M también podrían ser las principales incubadoras de nuevas generaciones de vida, pues son las estrellas que se siguen formando con más frecuencia. Se estima que el 92% de los planetas del universo aún no ha nacido. De los que ya existen y conocemos fuera del sistema solar, ¿hay algunos que puedan tener agua líquida y acoger seres vivos?

Exoplanetas conocidos con posible agua superficial (habitables)

Desde que se descubrió el primer exoplaneta en 1992, el número de los conocidos no ha dejado de aumentar. Sobre todo, gracias al telescopio espacial Kepler, que se dedicó a la búsqueda de planetas extrasolares en una pequeña región del cielo, en la constelación del Cisne.

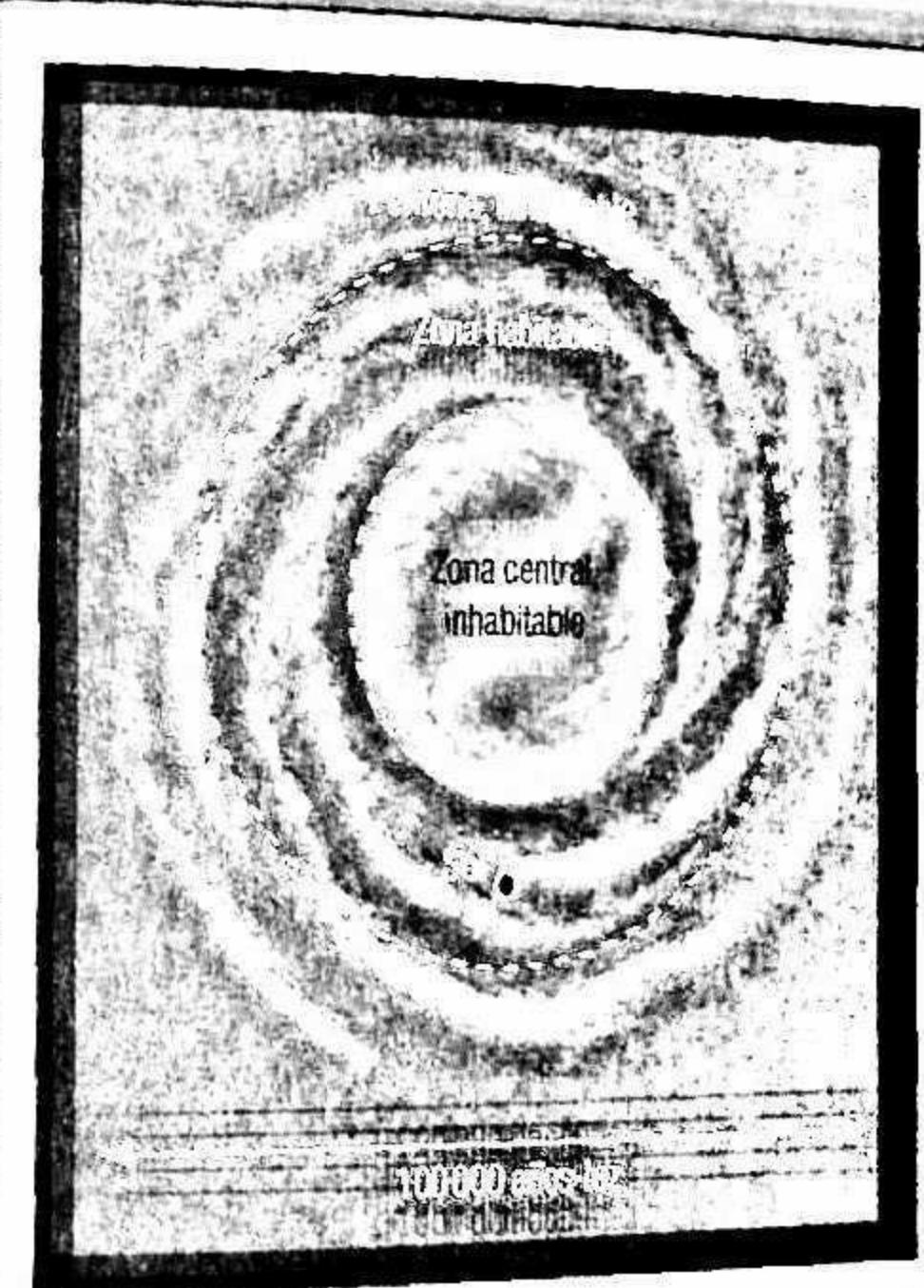
De los más de 3600 confirmados y más de 2000 pendientes de confirmar en 2017, interesan especialmente aquellos de los que tenemos datos para confiar en que son habitables (es decir, que probablemente tienen agua líquida en su superficie). En esa fecha ya se conocían 62 exoplanetas (casi todos tierras y supertierras, apenas alguna subtierra) habitables. En la tabla de la pág. 148 se muestran los trece más prometedores según la Universidad de

EL AGUA EN LAS GALAXIAS

Parece que las galaxias tienen menos elementos pesados conforme nos alejamos de su centro, con lo que podríamos esperar más agua y habitabilidad al acercarnos a él. Sin embargo, como las proximidades de los centros galácticos se perciben hostiles para la vida por la abundancia de supernovas y por existir un agujero negro con nocivas radiaciones gamma y X, seguramente las zonas de habitabilidad galáctica conformen una corona angular en la que el agua abunde lo suficiente y no se perciban los estragos del núcleo galáctico. Se estima que en la Vía Láctea la zona de habitabilidad se encuentra entre los 15 000 y los 38 000 años-luz desde el centro (véase la figura). El Sol está a unos 26 000 años-luz.

La variedad galáctica

Las galaxias suelen clasificarse en espirales, elípticas e irregulares. Las espirales, como la Vía Láctea, tienen un bulbo central denso y elíptico (como una galaxia elíptica en miniatura) del que parten brazos espirales. Las elípticas son aproximadamente elipsoides (una elipse en tres dimensiones), y suelen ser las más voluminosas y masivas. Las irregulares, por su parte, no tienen una estructura definida. Pero no se diferencian solo por la forma, y podemos preguntarnos si unas son más «húmedas» y habitables que otras. La astrofísica india Pratika Dayal y sus colegas han mostrado que las galaxias más grandes —habitualmente las elípticas— suelen ser las que tienen más elementos pesados, lo que incluye al oxígeno, con lo que tendrían, a este respecto, mayor probabilidad de contener agua. Como además contienen menos supernovas, Dayal estima que pueden alojar unas 10 000 veces más planetas habitables que las espirales como la Vía Láctea. Si es así, no seríamos tan «mediocres» como pensábamos, pues no estaríamos en una galaxia óptima para la vida.



Zona de habitabilidad de la Vía Láctea.

Nombre	Tipo estelar	Masa (M_\oplus)	Radio (R_\oplus)	Flujo (S_\oplus)	Distancia (a.-l.)	IST
Próxima b	M	$\geq 1,3$	1,1	0,70	4	0,87
Trappist-1 e	M	0,6	0,9	0,67	39	0,86
GJ667Cc	M	$\geq 3,8$	1,5	0,88	22	0,84
Kepler-422 b	K	2,3	1,3	0,70	1115	0,84
GJ667Cf*	M	$\geq 2,7$	1,4	0,56	22	0,77
Kepler-1229 b	M	2,7	1,4	0,49	769	0,73
Trappist-1 f	M	0,7	1,0	0,38	39	0,68
LHS 1140 b	M	6,6	1,4	0,41	41	0,68
Kapteyn b*	M	$\geq 4,8$	1,6	0,43	13	0,67
Kepler-62 f	K	2,8	1,4	0,39	1200	0,67
Kepler-186 f	M	1,5	1,2	0,29	561	0,61
GJ667 Ce*	M	$\geq 2,7$	1,4	0,30	22	0,60
Trappist-1 g	M	1,3	1,1	0,26	39	0,58

Exoplanetas potencialmente habitables. Lista de exoplanetas con mayor probabilidad de ser rocosos y mantener agua líquida en la superficie. Todos se hallan en la zona de habitabilidad.

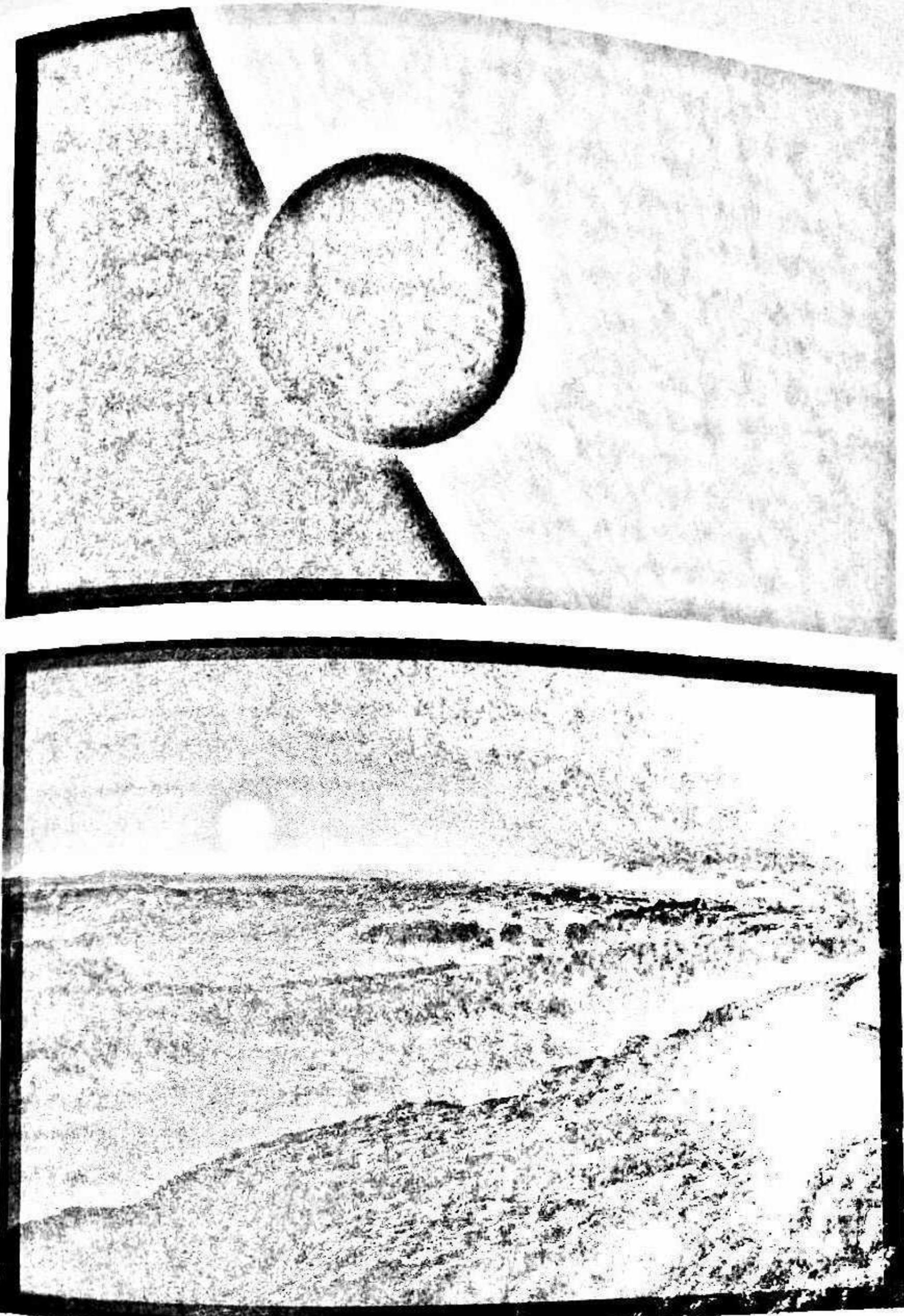
M: masas terrestres. R: radios terrestres. S: flujo de irradiación estelar media en relación con la terrestre.

Distancia: entre la estrella y el sistema solar, en años-luz. IST: índice de similitud con la Tierra.

*: Planeta candidato no confirmado. Los valores de algunas masas y radios son aún bastante imprecisos.

Puerto Rico en Arecibo, ordenados por su índice de similitud con la Tierra (IST). El planeta con mayor IST, Próxima b, es además el más cercano, pues gira alrededor de Próxima Centauri, a solo 4,2 años-luz (imagen inferior de la página contigua). También destacan el sorprendente sistema planetario en torno a Trappist-1 (a 39 años-luz), con nada menos que cuatro planetas habitables, y LHS 1140 b, a 40 años-luz, para algunos el mejor exoplaneta conocido en cuanto a sus posibilidades de desarrollar vida, aunque su IST no sea muy alto.

La habitabilidad de estos exoplanetas se ha estimado mediante modelos, teniendo en cuenta el tipo de estrella, la distancia a



Arriba, reconstrucción artística del tránsito de HAT-P-11b por delante de su estrella, desde la perspectiva visual de la Tierra. La luz estelar que atraviesa su atmósfera ha permitido detectar la presencia de vapor de agua. Abajo, recreación de panorama aéreo desde el planeta Próxima b.

ella del planeta, el radio y la masa estimados para este, y lo que tarda en completar una órbita, pero ¿se ha encontrado realmente agua en alguno?

Nos importan los planetas como la Tierra porque ahora sabemos que la vida, como sistema químico, necesita realmente un planeta pequeño con agua y rocas para originarse, surgir y sobrevivir.

DIMITAR SASSELOV

«transita» entre nosotros y la estrella, la luz de esta atraviesa la atmósfera planetaria —si la tiene— y sus elementos químicos dejan una «huella» espectroscópica en la luz que llega a los telescopios.

Los planetas que inicialmente pudieron analizarse así eran similares a Júpiter («jupiteres»), pero recientemente se ha conseguido detectar agua en dos «neptunos» (la masa de Júpiter es de más de 317 «tierras» , mientras que la de Neptuno es de solo 17). Se trata de HAT-P-11b (imagen superior de la página anterior), a unos 124 años-luz, y de HAT-P-26b, a 430 años-luz. Las detecciones han requerido la utilización de tres telescopios espaciales de la NASA (Hubble, Spitzer y Kepler), y han sido posibles gracias a que en estos casos las nubes de los planetas no han impedido las observaciones, y a que se ha descartado que la huella del agua venga de las propias estrellas (se sabe, por ejemplo, que nuestro Sol tiene agua en las manchas solares).

Desde luego, no hay esperanzas de que esos planetas, demasiado calientes por la proximidad a sus estrellas, y sin ninguna superficie en contacto con agua líquida, alberguen vida.

Por otro lado, el Spitzer ha observado en un sistema solar joven señales de una lluvia de cometas ricos en agua, pero para disponer de datos de las atmósferas de tierras y supertierras habrá que esperar la información de nuevos observatorios como el telescopio espacial James Webb, cuyo lanzamiento está previsto

a partir de octubre de 2018, y que es fruto de la colaboración de la NASA, la ESA y la CSA (la agencia espacial canadiense), con veinte países involucrados.

Los nuevos instrumentos serán cruciales para mejorar nuestro conocimiento del agua en el universo, y su relación con la vida, pero también será fundamental avanzar en la comprensión de las propiedades del agua en muy distintos ambientes mediante estudios de laboratorio, y en la elucidación de su dinámica en nuestro propio planeta. Estos avances pueden ser esenciales, además, para un control del agua que asegure en lo posible un adecuado acceso a ella de toda la población humana, aunque el logro de este objetivo no depende solo de conocimientos científicos y capacidad técnica, sino de concienciación social y voluntades políticas.

Sigue asombrándonos que tras una molécula de apariencia tan sencilla aparezca una complejidad de la que nos quedan tantos aspectos que descubrir y entender. El esfuerzo investigador merece sin duda la pena, pues, cuanto más sabemos del agua, más convencidos estamos de que es la matriz de la vida y la sustancia más extraordinaria del universo.

LECTURAS RECOMENDADAS

BALL, P., *H₂O. Una biografía del agua*, Madrid, Turner, 2007.

BOADA, M. Y MANEJA, R. (DIRS.), *El agua y la vida: cooperación en la esfera del agua*, Barcelona, CSIC/Lunwerg, 2013.

BRÜESCH, P., *Agua - su importancia en las ciencias, en la naturaleza y cultura, en las religiones del mundo y en el universo*, Zúrich, Eidgenössische Technische Hochschule, 2012.

ONU-AGUA, *Un objetivo global para el agua post-2015*, Nueva York, ONU-DAES, 2014.

RODRÍGUEZ, J.M. Y MARÍN, R., *Fisicoquímica de aguas*, Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 1999.

VV.AA., *El libro del agua*, Madrid, Editorial Debate, 2008.

VV.AA., *El agua (Temas Investigación y Ciencia, 24)*. Barcelona, Prensa Científica, 2001.

WWAP, *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016*, París, Unesco, 2016.

acuíferos 63, 67, 68, 73, 76, 77, 81, 83
contaminación de 76, 77
salinización de 73, 76
agricultura 67, 68, 72, 75, 80-82
agua
como recurso humano 66
pesada 26, 54
virtual 10, 68, 69
albedo 30, 46, 98
Alfa Centauri 55, 118
Allan, John Anthony 67, 68
ALMA, radiotelescopios 128, 130, 131
amoniaco 37, 44, 46, 47, 108, 111, 113, 114
anfípáticas, moléculas 44
asteroides 9, 53, 55-60, 87, 88, 92, 94, 99, 100, 104, 114
ATP (adenosina trifosfato) 41, 42
Benner, Steven A. 37, 40, 46, 47
Bradford, Matt 128
Burnham, Antony 58
Calisto 94, 101, 104, 106, 117, 119, 141
cambio climático 10, 65, 66, 73, 75, 81-83
capilaridad 34, 35
Caronte 115, 116
Caselli, Paola 113
Cassini-Huygens, misión 106, 110-112
Ceres 58, 99, 100, 114
chorros bipolares 129, 132
ciclo del agua (ciclo hidrológico) 10, 49, 62-67, 71, 81
cinta transportadora oceánica (circulación termohalina) 10, 63, 65, 66
cinturón
de asteroides 53, 56, 58, 99, 100

de Kuiper 53, 55-58, 114, 117, 118
clasificación espectral de Harvard (de las estrellas) 143
Cleaves, L. Ilseodore 52
Clementine, sonda 92
color del agua 51, 89, 113
cometas 9, 10, 12, 53, 55, 56, 58-60, 87, 88, 92, 100, 104, 116-118, 150
condritas 55, 57, 58
constante dieléctrica 38
Costard, François 94
Curiosity, vehículo robótico 94

Dawn, sonda 100
Dayal, Pratika 147
derecho humano al agua 67
desalinizadoras 77
deuterio 23, 52, 54, 56, 57, 124, 134
D/H (relación) 26, 52, 56-59, 90, 94
diagrama de fases 32, 33
Dione 106, 112, 113, 117
dióxido de carbono (CO_2) 31, 37, 39, 54
disco protoplanetario 52, 129, 132, 133
disociación del agua 39, 42, 43
disolvente, el agua como 9, 27, 37-40, 43, 46-48

ebullición, puntos de 27, 29, 30, 32
elementos pesados 123, 147
Encélado 11, 57, 104, 106-108, 110, 113, 117, 119, 137, 140, 142
enfermedades por déficit de agua 74, 75, 78, 79

escasez de agua
económica 71, 72
física 10, 67, 70-74, 76, 81
institucional 71
estrellas, formación de 125, 129, 132-135
estrés hídrico 9, 66, 67, 69-74, 78
Europa (satélite) 11, 94, 101-106, 117, 119, 137, 140, 142
evaporación 33, 35, 36, 64, 66, 77
exoplanetas habitables 12, 139, 141, 144, 146, 148

Falkenmark, Malin 69, 70
Famiglietti, Jay 66
fotolisis (fotodisociación) 54, 90
fotorrespiración 40
fotosíntesis 40, 41, 48
fuentes
hdrotermales submarinas (fumarolas hidrotermales submarinas) 31, 32, 36, 140
mejoradas 69, 74
 fusión, puntos de 33, 46

Ganímedes 94, 101, 104-106, 110, 117, 119, 141
García Ruiz, Juan Manuel 47
géiseres 102, 106, 108, 110
Gleick, Peter H. 67

Hallis, Lydia 58, 59, 61
Herschel (telescopio espacial) 56, 100, 127, 129, 133, 134
hidrofobicidad 9, 44-45
hidrógeno 11, 17, 19-23, 26-30, 34, 36-38, 40, 44, 47, 52, 54, 57, 61, 90, 98, 100, 110, 113, 123, 124, 132-134
hidrosfera 62, 136
distribución del agua en la 62

hielo
Ih 30, 46, 109, 142
VII 109, 142
XV 109
amorfo (agua vítreo) 109, 118, 126
caliente 109
densidad del 11, 18, 29-31, 109, 113, 126, 142
negro 88
tipos de 30, 109
Hoekstra, Arjen 68
Hubble, telescopio espacial 102, 105, 106, 150
huella hídrica 68, 69

índice
de estrés hídrico 69-71
de explotación del agua (IEA) 71, 73, 80
Instituto de Recursos Mundiales 73, 80
ionización del agua 88

James Webb, telescopio espacial 150
JUICE, misión 104, 106
Júpiter 11, 53, 56, 57, 87, 94, 99-104, 106, 113, 118, 137, 140, 150

Kasting, James 135
komatiítas 61
Kristensen, Lars 129, 132, 133

Lammer, Helmut 138, 142
línea de nieve 53, 55, 87, 88
Luna 55, 88, 91, 92, 95, 102, 105, 114, 145

magnetosfera 88, 92, 97, 98, 111, 136

marea, fuerzas de 102, 106, 137, 139
Mars Global Surveyor, misión 93
Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), sonda 93
Marte 11, 32, 33, 36, 37, 53, 55, 92, 93-99, 101, 104, 119, 135, 136, 140, 145
máser 127-129, 134
matriz de la vida 7, 13, 17, 18, 48, 128, 135, 151
megamáser 128
Mercurio 10, 88-90, 92, 104, 105, 145
Messenger, sonda 88
Miller, Stanley 101, 111
Miranda, Luis F. 134
molécula de agua 7, 8, 11, 15, 17, 19-22, 24-30, 32, 34, 35, 38, 39, 42, 48, 54, 59, 64, 89, 97, 102, 106, 109, 113, 125, 126, 128, 132-134, 151
muertes por déficit de agua 74, 78
mundos
clasificación de Lammer 138, 142
oceano 12, 140-142
superhabitables 12, 139, 144

Neptuno 53, 55, 57, 113, 114, 117, 118, 150
New Horizons, nave 114-116
nube de Oort 53, 55-57, 117, 118

Objetivos de Desarrollo del Milenio 74
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 10, 82
océanos subsuperficiales 87, 110-112, 114, 116, 137

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) 80, 81

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) 78, 80

origen del agua

- en el universo 123
- en la Tierra 26, 49, 51-53, 56, 58, 59, 125, 132, 147
- oxígeno 17, 19-23, 26-28, 37, 40, 54, 61, 90, 97, 98, 106, 113, 123-125, 132, 147
- como veneno 48
- origen del 11, 123, 124

Paracelso, Teofastro 7, 18, 48

Pearson, Graham 60, 61

pH 41-43, 48

planetas salvajes (errantes) 138

polaridad 27, 38, 39

polvo interestelar 126

protoestrellas 129, 132, 133

protones 20, 23, 26, 40-43, 123-125

- gradienes de 40, 41

puentes de hidrógeno 28, 30, 34, 36

punto triple del agua 33

rayas de tigre de Encélado 107, 108

reactivo, agua como 47, 48

regulador térmico 18

Resource Prospector, vehículo 93

riesgo hídrico 73

ringwoodita 60, 61

Rodríguez, Alexis 94

Rosetta, misión 56, 118

rubisco (ribulosa bisfosfato carboxilasa) 40

Sagan, Carl 9, 10, 51, 101

Saladino, Raffaele 47

Saturno 11, 47, 57, 106, 107, 110, 111, 113, 140

Spitzer, telescopio espacial 134, 150

Stardust, misión 118

supertierras 141, 146, 150

Szent-Györgyi, Albert 17

Tales de Mileto 7, 19

tensión superficial 34, 35

Tierra 9-12, 18, 19, 27, 33, 37, 39, 41, 49, 51-62, 64, 75, 85, 87, 88, 90-92, 97, 100, 102, 105, 109-111, 116-118, 129, 133-137, 139, 140, 144, 145, 148-150

Titán 47, 110-112, 117, 119, 137, 141

Tritón 114, 117, 119

Urano 57, 113

UV (ultravioleta), radiación 18, 54, 88, 90, 91, 97, 98, 111, 125, 133, 144, 145

Venus 11, 39, 90, 91, 97, 135, 140, 145

Venus Express, sonda 91

Zackrisson, Erik 146

zona habitable

- estelar 47, 91, 135, 136, 138, 139, 141, 145, 148
- galáctica 147